

Estudo da evolução da batimetria na foz do Rio Douro - análise comparativa, identificação dos fatores geradores de dinâmica e perspetivas futuras.

João Pedro Figueiredo Pinheiro

M
2017



Estudo da evolução da batimetria na foz do Rio
Douro - análise comparativa, identificação dos
fatores geradores de dinâmica e perspetivas
futuras.

João Pedro Figueiredo Pinheiro

João Pedro Figueiredo Pinheiro

Mestrado em Ciências do Mar - Recursos Marinhos
Biologia e Ecologia Marinhas

**Estudo da evolução da batimetria na foz do Rio Douro -
análise comparativa, identificação dos fatores geradores de
dinâmica e perspectivas futuras.**

M

2017

Dissertação de Candidatura ao grau de
Mestre em Ciências do Mar - Recursos
Marítimos submetida ao Instituto de
Ciências Biomédicas Abel Salazar da
Universidade do Porto.

Orientadora – Doutora Ana Bio
Categoria – Investigadora Auxiliar
Afiliação – Centro Interdisciplinar de
Investigação Marinha e Ambiental da
Universidade do Porto



João Pedro Figueiredo Pinheiro

Mestrado em Ciências do Mar - Recursos Marinhos
Biologia e Ecologia Marinhas

**Estudo da evolução da batimetria na foz do Rio Douro -
análise comparativa, identificação dos fatores geradores de
dinâmica e perspectivas futuras.**

M

2017



Pelo Querer Saber,
Da Paixão pelo Mar à vontade de Fazer,
Por Acreditar Sonhar em Potenciar Crescer,
Com (a) Ciência ajudar a um Planeta mais Azul Ter,
Na Conquista do Desconhecido a Descobrir o Caminho do Ser,
Um SEMPRE SIGA a Novos Desafios...

| AGRADECIMENTOS

À orientadora Dr^a Ana Bio pela incessante partilha de conhecimentos, pela infindável paciência, pelo imensurável esforço em me ajudar a alcançar resultados e pelas pertinentes e sempre oportunas correções e críticas.

Ao Eng^o José Alberto Gonçalves do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), e do CIIMAR, Universidade do Porto por ser uma fonte de saber, pela vontade e paixão que tem em ensinar, pelo auxílio prestado na validação e integração de dados, procedimentos de importância nuclear para garantir a precisão e exatidão das análises efetuadas.

Ao Eng.^o Américo Magalhães, do Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros (OAUP), pelas inúmeras horas de navegação, tendo sido “obrigado” a madrugar, a sujeitar-se à agitação marítima, ao frio, à inexistência de refeições, sem que alguma vez tenha proferido qualquer queixa ou lamúria, nem mesmo da inexistência de conforto e da constante necessidade de estar a abraçar o computador portátil.

Ao Eng.^o Paulo Faria, da Reserva Natural Local do Estuário do Douro, pela paixão que o move no que faz, por sem qualquer necessidade ou obrigação, não ter hesitado um segundo em por as “mãos à obra”, tendo de enxada e marreta na mão prestado um auxílio incansável no trabalho de fixação das estacas, e claro, por me ter confiado “as chaves da sua casa” garantindo-me acesso pleno e incondicional à “sua” Reserva.

À Reserva Natural Local do Estuário do Douro, da Câmara Municipal de Vila Nova de Gaia por ter autorizado a colocação das estacas e não ter levantado qualquer entrave nem à recolha cíclica de leituras nem à navegação durante os levantamentos batimétricos.

Ao CIIMAR pela disponibilização de meios técnicos e físicos.

Ao OAUP da FCUP pela cedência dos equipamentos de localização de precisão.

À NAVIONICS[®] pelo apoio e pela partilha parcial de conhecimentos.

Ao Tiago e à Inês pelo crédito acumulado de horas de brincadeiras, atenção e carinho.

| RESUMO

O estuário do Rio Douro é de grande importância tanto socio-económica como natural. Sendo um sistema navegável limitado por margens escarpadas e urbanizadas, é crucial entender e monitorizar a morfodinâmica do seu leito e da embocadura que condicionam a capacidade de escoamento do rio, sobretudo em caso de cheias, e a navegabilidade.

O presente trabalho visa estudar a dinâmica de curto (meses) e médio prazos (anos) do leito, a batimetria, e os volumes da coluna de água, procurando caracterizar padrões de transporte de sedimentos e relacioná-los com possíveis fatores potenciadores, nomeadamente a agitação marítima e o caudal fluvial.

Para tal procedeu-se a um estudo detalhado da batimetria na foz do Rio Douro, baseado em três levantamentos batimétricos (janeiro, abril e junho de 2017) efetuados no âmbito deste mestrado com sonares de feixe simples, caracterizaram-se as condições de agitação marítima e de caudais para o período de estudo. Todos os procedimentos desde a obtenção dos dados em bruto, à sua análise, integração, e tratamento, foram executados de forma direta e uniforme no âmbito do presente trabalho, assim garantindo a plena comparabilidade, aumentando o rigor e conferindo confiança nos resultados das análises efetuadas. Para apurar a dinâmica numa escala temporal maior, foram considerados dados de profundidade previamente obtidos (de setembro de 2015 e março de 2016), tendo sido utilizados os mesmos critérios de processamento aplicados aos dados obtidos diretamente.

Os resultados alcançados foram coerentes e comparáveis, permitindo a identificação dos **locais com maior dinâmica de movimentação de sedimentos**: a embocadura do Rio Douro, principalmente a Norte do quebra-mar destacado, a margem direita do rio entre a Ribeira da Granja e os Pilotos e, na margem esquerda, a Baía de São Paio e a restinga. Concluiu-se por um **contínuo processo de assoreamento desde março de 2016**, com perdas significativas de volume da coluna de água, sendo notório o **aumento da pressão resultante da movimentação de inertes das margens para as áreas de maior profundidade do leito do rio**, restringindo o canal de navegação. Foram quantificadas **perdas de profundidade superiores a 5 m num período temporal inferior a 5 meses**. Relacionamos a tendência de **assoreamento observada com os reduzidos caudais do Rio Douro**, contudo, é necessário continuar a monitorizar no sentido de dissecar inter-relações.

A **restinga do Douro** tem verificado um crescimento contínuo desde a construção do molhe destacado, quer em área e volume, quer nas zonas intertidais limítrofes, tornando-se praticamente intransponível – em caso de cheia. Tendo em conta a dimensão da bacia hidrográfica do Rio Douro e os períodos cíclicos de caudais extremos, é espetável que de forma recorrente ocorram caudais com valores entre os 5.000 m³/s e os 10.000 m³/s,

devendo ser **estudada a hidrodinâmica da Barra do Rio Douro** avaliando a sua **capacidade de escoamento**, estabelecendo **limites máximos para a área e volume da restinga** e definindo **cotas mínimas da profundidade e volume**, salvaguardando a **hidrografia estuarina**, o **equilíbrio dos ecossistemas** e garantindo que **os danos em situações de caudais extremos serão minorados**.

Considerado que a Foz do Douro está exposta a inúmeros fatores que geram dinâmica, para perceber esses movimentos e minimizar as suas consequências é fundamental **possuir dados batimétricos cíclicos** que, interrelacionados com fatores como o **caudal**, **agitação marítima**, **marés** e **fatores atmosféricos**, permitirão construir um **modelo hidrodinâmico do estuário do Douro**, adaptável aos diferentes parâmetros e condicionantes. Assim será possível assegurar a **navegabilidade do Rio Douro**, garantir a contínua **renovação da água no estuário** e monitorizar a **capacidade de escoamento dos caudais excessivos para o mar**.

Palavras-chave: Batimetria; Hidrodinâmica Estuarina; Embocadura do Rio Douro; Sonar; Detecção Remota.

| ABSTRACT

The Douro estuary is of considerable socio-economic and natural importance. The estuary, which is embedded in a steep yet heavily urbanized valley, is used for navigation. It is therefore crucial to understand and monitor the morphodynamics of the estuary and the river mouth, which condition river discharge into the sea, particularly considering possible flood events and navigation safety.

The present work aims to study short (months) and medium-term (years) bottom dynamics, bathymetry, and water column volumes, in order to characterize sediment transport patterns and to relate them to potentially influencing factors, namely ocean wave climate and river flow.

Therefore, a detailed study of the Douro mouth bathymetry took place, based on three bathymetric surveys (in January, April and September 2017) carried out during the MSc, using single beam echo sounders and characterizing wave climate and river flow conditions during the study period. In this work, all procedures, from raw data collection, to data analysis, integration and treatment, were all directly applied, to guarantee comparable results, and enhance accuracy. To assess longer-term dynamics, additional, previously collected bathymetry data (from September 2015 and March 2016) were studied using analogous procedures and the same criteria as those applied to the data collected for the MSc.

The results proved to be coherent and comparable, allowing **identification of hotspots of sediment dynamics**, found in: the river mouth, especially to the north of the detached breakwater; on the right, northern, river margin, between Ribeira da Granja and Pilotos; and on the southern margin in the São Paio bay and the sand spit. From **March 2016 onwards, continuous sediment deposition was observed**, with significant losses of water column volume, with **increasing pressure of sediment movements to deeper areas of the river bed**, i.e. the navigation channel. **Depth losses of up to 5 m were observed, in five months**. Further monitoring is, however, needed to see if the **observed silting-up is related to the observed low river flow**.

Since the construction of the detached breakwater, the Douro sand spit and its neighbouring intertidal areas have suffered continuous accretion. Consequently, the spit has increased its area and volume and become practically unbreachable. Given the size of the Douro drainage basin and the occurrence of cyclic extreme river flows, which can reach 5.000 m³/s to 10.000 m³/s, we need to **study the hydrodynamics of the river mouth, evaluating its discharge capacity, establish limits for the sand spit area and volume, and establish minimum river mouth depths and water volumes, to protect the estuarine hydrography and ecosystem equilibrium, and to minimize flood damages**.

Given that the Douro mouth is exposed to numerous factors that generate dynamics, and given the need to understand sediment movements and minimize negative effects, it **is fundamental to monitor bathymetry**, and to **analyse it in relation to factors like river flow, wave climate, tides and atmospheric conditions, to build a hydrodynamic model of the Douro Estuary** that can be adapted to different conditions and scenarios. This way, **navigation security in the Douro River** and a **continuous renovation of the water in the estuary** can be assured, and the **discharge capacity** of the system can be monitored.

Keywords: Bathymetry; Estuary Hydrodynamics; Douro River mouth; Sonar; Remote Sensing.

	ÍNDICE	
	AGRADECIMENTOS	
	RESUMO	
	ABSTRACT	
	ÍNDICE	
	ÍNDICE DE FIGURAS	
	ÍNDICE DE TABELAS	
	LISTA DE ABREVIATURAS	
	CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Estado da Arte	6
1.3	Objetivos	8
	CAPÍTULO 2 ÁREA DE ESTUDO	9
2.1	Caracterização do Estuário do Rio Douro	11
2.2	Molhes do Rio Douro	12
2.3	Restinga	15
2.4	Evolução dos Caudais	18
2.5	Agitação Marítima	18
2.6	Sedimentos na Baía de São Paio	18
	CAPÍTULO 3 BATIMETRIA	21
3.1	Tecnologia sonar	21
3.2	LiDAR (Light Detection And Ranging)	32
3.3	Levantamentos Batimétricos Efetuados	34
3.4	Outros Levantamentos Batimétricos	37
3.5	Resolução – Normas Internacionais IHO	39
3.5.1	Resolução Vertical	41
3.5.2	Resolução Horizontal	43
3.6	Análises SIG – Tratamento prévio dos dados	46
	CAPÍTULO 4 RESULTADOS	49
4.1	Evolução de Caudais do Rio Douro – 2000 a 2017	49
4.2	Análise da Agitação Marítima	51
4.3	Variações de Sedimentos na Baía de São Paio	53
4.4	Batimetrias Interpoladas	55
4.5	Batimetria – Dinâmica de Curto Prazo	60
4.6	Batimetria – Dinâmica de Médio Prazo	68
4.7	Evolução do Volume da Coluna de Água	70
4.8	Evolução dos Perfis de Profundidade	73
	CAPÍTULO 5 DISCUSSÃO	79
	CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES	83
	CAPÍTULO 7 LIMITAÇÕES	85
	REFERÊNCIAS	86
	ANEXOS	92

| ÍNDICE DE FIGURAS

Figura capa – A Barra do Douro após a edificação dos novos paredões (fonte: http://www.archdaily.com.br/br/01-75903/molhes-do-douro-carlos-prata-arquitecto/75903_75922).

Figura 1 – Planeta Terra sem água (fonte: <http://www.teledyne-reson.com/products/echo-sounder-seabat/>).

Figura 2 – Carta náutica da embocadura do Rio Douro – NAVIONICS® (fonte: <https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@13&key=cpbzFzk%7Cs%40> – 10/09/2017).

Figura 3 – Navio de Cruzeiros Costa Concordia. Danos no casco da embarcação, sendo perceptível um pedaço de rocha preso ao casco no local do rombo (fonte: http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2012/06/14/article-2159234-0F7474AE00000578-457_634x333.jpg).

Figura 4 – Danos na proa do submarino nuclear americano – USS San Francisco (SSN-711) (fonte: <https://www.navysite.de/ssn/ssn711.htm>, 2017).

Figura 5 – Estuário do rio Douro em 1995 (fonte: <http://ortos.igeo.pt/ortofotos/>).

Figura 6 – Estuário do rio Douro (fonte: Google Earth – 10 de maio 2013).

Figura 7 – Perigos da entrada na Barra do Douro, 1855, *View of the Bar of Oporto*.

Figura 8 – Planta da Foz do Douro, Plano de melhoramento da Barra do Porto, Eng.º Luís Gomes de Carvalho, Corpo de Engenheiros, 1820.

Figura 9 – Imagens aéreas molhes do Rio Douro (fonte: http://www.icsa.pt/client/skins/a_negocio.asp?page=28).

Figura 10 – Litografia – Planta do Porto e suas Vizinhanças /A.Mip Alvis deli, 1829 London: Dean J. Murray Lithographers.

Figura 11 – Carta de 1833, impressa em Inglaterra apresenta preocupações relativas à navegabilidade do Rio Douro, definindo um “canal”.

Figura 12 – Evolução do Cabedelo nos últimos 150 anos.
Fonte: Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, APDL.

Figura 13 – Evolução recente do Cabedelo 2003 a 2016 (fonte: Google Earth 2017).

Figura 14 – Fotografias da instalação de 3 estacas, no dia 13 de Jan. de 2017, na Baía de São Paio.

Figura 15 – Localização das estacas métricas dentro do limite da Reserva Da Baía de São Paio.

Figura 16 – Imagens das estacas no decurso do processo de recolha de leituras da variação dos sedimentos.

Figura 17 – Diagrama que ilustra os diferentes tipos de dados acústicos que podem ser obtidos por sondas MBES: a) Medição batimétrica; b) Medição do retroespalhamento/reverberação do fundo do mar; c) Espectro da coluna de água (adaptada de Lurton, 2010).

Figura 18 – MBES vs SBES – Diferença entre um pulso sonar MBES e um pulso sonar SBES (número de feixes, pegada do pulso e varrimento da insonorização do fundo do mar) (adaptado de S. James, 2015).

Figura 19 – Faixas de pegada e feixes de LiDAR e MBES de acordo com variações de a profundidade (Stephenson, 2007).

Figura 20 – Equipamento sonar instalado da embarcação e pesquisa: transdutor de BB, *plotters* da marca Lowrance modelo HDS 7 de feixe simples de BB e EB e transdutor de EB.

Figura 21 – Sistemas de GPS Diferencial instalados na embarcação de pesquisa.

Figura 22 – Malha da máscara das linhas idealizadas como percurso dos levantamentos batimétricos.

Figura 23 – Percurso efetivamente realizado (rasto de navegação) no decurso do levantamento batimétrico do dia 9 de janeiro de 2017.

Figura 24 – Percurso efetivamente realizado (rasto de navegação) no decurso do levantamento batimétrico do dia 9 de janeiro de 2017.

Figura 25 – Percurso efetivamente realizado (rasto de navegação) no decurso do levantamento batimétrico do dia 2 de abril de 2017.

Figura 26 – Percurso efetivamente realizado (rasto de navegação) no decurso do levantamento batimétrico do dia 5 de junho de 2017.

Figura 27 – Carta do estuário do Douro, Instituto Hidrográfico, VND-EST-001/15ST, setembro 2015 – Escala 1:2 000, sistema de projeção PT-TM06 / Datum ETRS89, unidades em metros referidas ao ZH (situado 2 m abaixo do NMA).

Figura 28 – Ortofotomapa do estuário do Douro, Instituto Hidrográfico, VND-EST-001/15MB, setembro 2015 – Escala 1:2 000, sistema de projeção PT-TM06 / Datum ETRS89, unidades em metros referidas ao ZH (situado a 2 m abaixo do NMA).

Figura 29 – Pontos do levantamento batimétrico do IH (esq.) e resultado da interpolação efetuada (dir.).

Figura 30 – Pontos do levantamento batimétrico de março de 2016 (esq.) e resultado da interpolação efetuada (dir.).

Figura 31 – Posicionamento e distâncias entre equipamentos de pesquisa batimétrica instalados na embarcação, painel de proa: (esquerda) antena com equipamento DGPS e dois transdutores, disposição lateral dos equipamentos no painel de popa (direita).

Figura 32 – Diagrama de fluxo dos procedimentos relativos à obtenção e tratamento de dados batimétricos, do sonar ao ArcGIS®.

Figura 33 – Caudal efluente mensal na barragem de Crestuma Lever ($\text{hm}^3/\text{mês}$), entre janeiro de 2000 e julho de 2017 (fonte: <http://snirh.pt/> (setembro de 2017)).

Figura 34 – Direção e intensidade da agitação marítima medida na boia ondógrafo de Leixões, do IH, com a distribuição das direções médias ($^{\circ}$) para diferentes classes de altura significativa (m).

Figura 35 – Agitação marítima registada na boia ondógrafo de Leixões de outubro de 2016 a junho de 2017.

Figura 36 – Batimetrias interpoladas do levantamento de 9 janeiro de 2017, ArcGIS®.

Figura 37 – Batimetrias interpoladas do levantamento de 4 de abril de 2017, ArcGIS®.

Figura 38 – Batimetrias interpoladas do levantamento de 5 de junho de 2017, ArcGIS®.

Figura 39 – Imagens que suportam as variações visuais das batimétricas na embocadura do Rio Douro, entre janeiro e junho de 2017, ArcGIS®.

Figura 40 – MDT's das batimétricas interpoladas da margem direita do Rio Douro na envolvente da Ribeira da Granja em janeiro e junho de 2017, ArcGIS®.

Figura 41 – MDT's das batimétricas interpoladas da margem esquerda do Rio Douro na envolvente da Baía de São Paio, em janeiro, Abril e junho de 2017, ArcGIS®.

Figura 42 – MDT's das batimétricas interpoladas na zona exterior da embocadura do Rio Douro, em janeiro, Abril e junho de 2017, ArcGIS®.

Figura 43 – Diferenças de Batimetria entre janeiro e abril de 2017, ArcGIS®.

Figura 44 – Diferenças de Batimetria entre abril e junho, ArcGIS®.

Figura 45 – Diferenças de Batimetria entre janeiro e junho, ArcGIS®.

Figura 46 – Carta (em cima) e ortofotomapa (em baixo) do estuário do Douro, Instituto Hidrográfico, VND-EST-001/15ST e VND-EST-001/15MB, setembro 2015 – Escala 1:2 000, sistema de projeção PT-TM06 / Datum ETRS89, unidades em metros referidas ao ZH (situado 2 m abaixo do NMA).

Figura 47 – Batimetrias interpoladas do levantamento de 16 março de 2016, ArcGIS®.

Figura 48 – Carta náutica da Navionics® da embocadura do rio Douro (fonte: <https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@15&key=y%7CbzFls%7Ds%40>).

Figura 49 – DMDT's das batimétricas interpoladas na zona exterior da embocadura do Rio Douro: jan. vs abr., abr. vs jun. e jan. vs jun. de 2017, ArcGIS®.

Figura 50 – DMDT's das batimétricas interpoladas na margem direita do Rio Douro, da zona a montante dos Pilotos até ao início do molhe Norte: jan. vs abr. e abr. vs jun. de 2017, ArcGIS®.

Figura 51 – DMDT's das batimétricas interpoladas no topo Norte da restinga: jan. vs abr. e jan. vs jun. de 2017, ArcGIS®.

Figura 52 – DMDT's das batimétricas interpoladas no topo Norte da restinga e na área envolvente ao quebra-mar destacado: jan. vs abr. e jan. vs jun. de 2017, ArcGIS®.

Figura 53 – Mosaico de ortofotos obtidas em 2015 no âmbito de trabalho de campo executados pelo OAUP.

Figura 54 – DMDT's das batimétricas interpoladas na área envolvente à foz da Ribeira da Granja: jan. vs abr. e jan. vs abr. de 2017, ArcGIS®.

Figura 55 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre setembro 2015 e março 2016, ArcGIS®.

Figura 56 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre setembro 2015 e janeiro 2017, ArcGIS®.

Figura 57 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre setembro 2015 e junho 2017, ArcGIS®.

Figura 58 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre março 2016 e janeiro 2017, ArcGIS®.

Figura 59 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre março 2016 e junho 2017, ArcGIS®.

Figura 60 – Definição das zonas de cálculo dos volumes ArcGIS®.

Figura 61 – Variações do volume e do volume em função da área nas zonas selecionadas.

Figura 62 – Definição dos perfis transversais, ArcGIS®.

Figura 63 – Perfil Transversal Barra vs Molhe Norte, setembro 2015 a junho 2017, ArcGIS®.

Figura 64 – Perfil Transversal Barra quebra-mar, setembro 2015 a junho 2017, ArcGIS®.

Figura 65 – Perfil transversal Pilotos, setembro 2015 a junho 2017, ArcGIS®.

| ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro resumo com evolução da altura, da área e do volume da restinga.

Tabela 2 – Súmula dos dados em bruto considerados válidos resultantes dos 3 levantamentos efetuados com os sonares.

Tabela 3 – Comparação entre a profundidade registada nos sonares e a profundidade medida nas estacas fixas. Comparação com os 4 *standards* do IHO.

Tabela 4 – Variações das leituras de profundidade de acordo com diferentes velocidades de navegação.

Tabela 5 – Caudal efluente médio (m^3/s) e caudal total (hm^3) mensal da barragem de Crestuma-Lever, entre janeiro de 2000 e julho de 2017 (fonte: <http://snirh.pt/> (set.2017)).

Tabela 6 – Distribuição mensal da altura significativa média, da altura máxima e do período médio (outubro de 2016 a junho de 2017).

Tabela 7 – Variações da altura dos sedimentos de três estacas métricas colocadas na zona intertidal da reserva da Baía de São Paio

Tabela 8 – Quantificação da Área e do Volume das zonas selecionadas, com análise comparativa das respetivas evoluções.

Tabela 9 – Análise da profundidade média, mínima e máxima dos Perfis.

Tabela A1 – Súmula dos dados em bruto considerados válidos resultantes dos 3 levantamentos efetuados com os sonares (versão extensa).

Tabela A2 – Caudal efluente médio (m^3/s) e caudal total (hm^3) mensal da barragem de Crestuma-Lever, entre janeiro de 2000 e julho de 2017 (fonte: <http://snirh.pt/> (set. 2017)) (versão extensa).

Tabela A3 – Quantificação da Área e do Volume das zonas selecionadas, com análise comparativa das respetivas evoluções (versão extensa).

| LISTA DE ABREVIATURAS

APA – Agência Portuguesa do Ambiente
ALB – Airborne LiDAR Bathymetry
APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo
BB – Bombordo
CIIMAR – Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental
CORS – Continuously Operating Reference Station
DGPS – Differential Global Positioning System – GPS Diferencial
DMDT – Diferenças entre Modelos Digitais do Terreno
EB – Estibordo
ETRS – European Terrestrial Reference System
EUA – Estados Unidos da América
FCUP – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
GEBCO – General Bathymetric Chart of the Oceans
GNSS – Global Navigation Satellite Systems
GPS – Global Positioning System
Hmax – Altura máxima em metros
HS – Altura significativa em metros
IH – Instituto Hidrográfico
IHO – International Hydrographic Organization – Organização Hidrográfica Int.
IMU – Inertial Measurement Unit – sensor de inércia
IOC – Intergovernmental Oceanographic Commission
ITRS – International Terrestrial Reference System – Sistema de Referência Terrestre Int.
kHz – Kilohertz
LiDAR – Light Detection and Ranging
MBES – MultiBeam EchoSounding – Sondas de feixe múltiplo
MDT – Modelos Digitais do Terreno
NMA – nível médio do mar adotado
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
OAUP – Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros
PPT – Parts Per Trillion
RTK – Real Time Kinematic – Posicionamento Cinemático em Tempo-Real
SBES – SingleBeam Echo Sounders – Sondas de feixe simples
SIG – Sistema de Informação Geográfica (GIS – Geographic Information System)
SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SONAR – SOund, NAvigation and Ranging
SSS – Side Scan Sonars
Thpt – Direção da ondulação de pico em graus
Ths – Período médio em segundos
THU – Total Horizontal Uncertainty – Incerteza horizontal
TPU – Total Propagated Uncertainty – Incerteza total
TVU – Total Vertical Uncertainty – Incerteza vertical
UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
WCB – Water Column Backscatter
WGS – World Geodetic System
ZH – Zero Hidrográfico

CAPÍTULO 1 | INTRODUÇÃO

1.1 | Enquadramento

Os oceanos são uma força vital do planeta Terra, definindo o clima, regulando a temperatura, suportando todos os organismos vivos, desempenhando um papel fundamental para os humanos, garantindo o seu sustento, transportes, comércio, crescimento e inspiração. Considerando o processo de interação contínua dos elementos naturais, mudanças de profundidade, as dinâmicas dos oceanos, alterações de parâmetros, temperatura e pressões, as movimentações dos fundos marinhos e as características da coluna de água, mas fundamentalmente pela dimensão conclui-se que os oceanos são a última fronteira da Terra por explorar. De acordo com a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) está explorado menos do que 15% do oceano, sendo a grandeza dos números impressionante: 3.688 m que é a profundidade média dos oceanos; 71% da superfície da Terra é coberta por oceanos (Eakins e Sharman, 2010); o oceano contém 1.335.000.000 Km³ de água, 99% do espaço em que a vida é possível no planeta – a biosfera – está no oceano (figura 1). A NOAA mais refere que 85% do fundo do mar não está mapeado usando métodos modernos. Face ao exposto conclui-se pela crescente importância da exploração científica desta área (Main, 2016a). Martin Jakobsson, investigador da Universidade de Estocolmo, afirmou mesmo que "conhecemos a superfície de Marte melhor do que o fundo do mar".



Figura 1 – Planeta Terra sem água
(fonte: <http://www.teledyne-reson.com/products/echo-sounder-seabat>).

Batimetria é o estudo do chão, do "pisso" dos corpos de água, da topografia submarina, das diferentes profundidades e formas do terreno subaquático. O conhecimento da evolução da profundidade, dos diferentes tipos de leito do mar, o estudo dos movimentos subaquáticos e as alterações topográficas ajudam a alcançar um conhecimento da dinâmica de evolução. O fundo marinho e as áreas estuarinas estão em permanente alteração, verificando-se de forma cíclica fenómenos de erosão, deposição ou transferência de sedimentos, sujeitos a ação das marés, da agitação marítima e das correntes. Para entender suas dinâmicas, tendências e evolução é necessário efetuar pesquisas batimétricas, comparando os sucessivos Modelos Digitais do Terreno (MDT), e calculando os volumes associados.

Hidrografia é a ciência que estuda e descreve as características físicas dos corpos de água, inclui, nomeadamente, a batimetria, a forma e as características da linha de costa, as características de marés, correntes e ondas, e as propriedades físicas e químicas da própria coluna de água, bem como a sua evolução e a previsão das suas alterações ao longo do tempo (Thurman e Trujillo, 2003).

O levantamento para fins hidrográficos consiste em agregar informações da profundidade, da morfologia, espessura e composição dos fundos, da coluna de água, processando e analisando os dados obtidos interrelacionando elementos e manipulando variáveis assim explicitando resultados e estimando evoluções. A abrangência de dados resultantes dos levantamentos batimétricos e crescente integração com outros parâmetros tem vindo a originar um maior interesse na partilha de informação e a interação de diferentes áreas científicas, possibilitando produzir diferentes *outputs*, tendo em conta quer os interesses de cada área do conhecimento, aprofundando o conhecimento científico, com aplicação prática com beneficiários diretos desta área do conhecimento (IH Portugal, 2010).

Fruto do crescente interesse nos assuntos do mar, perante a necessidade transversal (política, económica, científica) em conhecer os oceanos, transformaram os atuais levantamentos batimétricos como uma fonte de dados cuja análise envolve diversas valências, fornecendo conhecimento a diversos setores económicos, nomeadamente, a navegação (cartas náuticas) (figura 2), a pesca, a produção de energias renováveis, a aquacultura, o transporte marítimo, do ordenamento costeiro, previsão da propagação dos tsunamis (uma vez que estes fenómenos extremos são guiados pelo relevo do fundo do oceano), alterações climáticas (oscilações de temperaturas por estratos, as marcas de glaciares no fundo do mar), biodiversidade marinha – novas formas de vida (nos abismos junto a chaminés, montanhas submarinas, ou depressões).



Figura 2 – Carta náutica da embocadura do Rio Douro – NAVIONICS®
(fonte: <https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@13&key=cpbzFzk%7Cs%40> -10/09/2017)

As cartas náuticas, inicialmente em papel agora digitais, registam de forma precisa a localização dos perigos e das ajudas à navegação, permitindo definir de acordo com o calado as melhores rotas para uma navegação segura. No entanto, é fundamental relacionar demais condicionantes, como sejam, os fatores atmosféricos (ex.: vento), o estado do mar (ex.: correntes, agitação marítima), as variações da maré (ex.: restrições calado em navegação de canais estreitos, no acesso aos portos, realização de manobras, o cálculo da carga dos navios e da velocidade de navegação dos navios), as oscilações registadas pelos sensores de movimento do navio (velocidade de navegação, alterações do regime das máquinas dos motores, as oscilações na linha de água, inclinação horizontal e vertical). A junção de todas estas variáveis permite agregar um conjunto de informações que conferem maior rigor de análise, permitindo traçar rotas que potenciem o binómio tempo de navegação/segurança. Um incidente como o do navio de cruzeiro “Costa Concordia” em janeiro de 2012 (figura 3), que ao navegar junto à costa Italiana na proximidade da ilha de Giglio, navegou numa área sem a profundidade necessária tendo embatido contra o fundo rochoso. Este acidente provocou a morte a 32 pessoas, o desmantelamento do navio e uma operação internacional para a remoção do navio cujos prejuízos ultrapassaram 1,1 bilhão de dólares.



Figura 3 – Navio de Cruzeiros Costa Concordia. Danos no casco da embarcação, sendo perceptível um pedaço de rocha preso ao casco no local do rombo.
(fonte: http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2012/06/14/article-2159234-0F7474AE00000578-457_634x333.jpg).

Outro incidente ocorreu em janeiro de 2005 quando um submarino nuclear dos EUA (figura 4) embateu contra uma montanha submarina durante um exercício de navegação, em que o comando da embarcação era efetuado apenas com cartas de navegação, a 160 m da superfície, à velocidade de 38 milhas por hora.



Figura 4 – Danos na proa do submarino nuclear americano – USS *San Francisco* (SSN-711)
(fonte: <https://www.navysite.de/ssn/ssn711.htm>, 2017).

Estes incidentes ocorrem por omissões/falta de precisão das cartas de navegação ou por erro humano, desvio de rotas ou errado planeamento de rotas (sem validar marés, correntes, ondulação, fatores atmosféricos).

Mais se refira que a probabilidade de ocorrerem estes incidentes pode ser minorada se as cartas náuticas estiverem atualizadas e se forem tidos em consideração outros parâmetros para além da localização GPS (Global Positioning System) das embarcações, como sejam a profundidade efetiva a que os navios estão a navegar (permitindo confrontar os dados sonar com as cartas náuticas, aferindo a sua precisão e definindo a rota dos navios com base em ambos os dados assim diminuindo os riscos de navegação), as marés e a ocorrência de outros fenómenos atmosféricos que influenciem o nível do mar. A adoção de um sistema integrado de navegação irá além de diminuir a probabilidade de ocorrerem acidentes, permitir planejar as rotas de forma mais eficaz possibilitando que os navios cheguem ao seu destino no menor espaço de tempo possível, salvaguardando as condições de segurança, e da forma mais eficiente, nomeadamente, reduzindo custos com combustível (IH Portugal, 2010).

O recurso à tecnologia mais recente de sonar multifeixe para levantamento batimétrico, permite insonorizar e obter dados e profundidade para a totalidade da área em estudo, aumenta a precisão das diversas leituras obtidas e a exatidão da profundidade dos pontos face à realidade, e dispensa o recurso a interpolações (Lurton, 2010). Outra evolução determinante prende-se com a crescente diminuição do tempo necessário à execução do levantamento batimétrico versus dimensão da área coberta, tendo a eficiência dos levantamentos vindo a melhorar exponencialmente ao longo dos últimos anos, permitindo cobrir vastas áreas em períodos temporais que há 10 anos eram impensáveis. Mas para além da profundidade, fruto da evolução das tecnologias de deteção remota e dos desenvolvimentos verificados na interrogação e análise dos dados obtidos, em cada levantamento são obtidos dados relativos a um conjunto de elementos, nomeadamente, a composição dos fundos oceânicos (areia, lama, rocha, coral), a sua espessura e estrutura conceptual, a composição da coluna de água, a identificação e quantificação da biodiversidade. Ou seja, os desenvolvimentos recentes da tecnologia sonar fizeram com que da sua utilização resultassem mais dados os quais permitem alimentar outros fins para além dos levantamentos batimétricos, ou mesmo da hidrografia, como sejam: o estudo do meio ambiente, a caracterização de habitats, a oceanografia, a exploração de recursos marinhos geofísicos/geológicos (entender a evolução geológica, para encontrar diferentes minerais, para quantificar materiais e volumes a dragar), as atividades *offshore*, a arqueologia, a biologia marinha, a deteção de petróleo, inspecionar *pipelines* e cabos subaquáticos, a quantificação e volumes dragados, a realização de inspeções subaquáticas de infraestruturas e a localização de objetos.

Considerando a permanente dinâmica do meio aquático, quer fruto de fatores naturais, como sejam: marés, correntes, agitação marítima, ventos, transporte de sedimentos, quer fruto de fatores antropogénicos como sejam a poluição, a artificialização costeira, os aproveitamentos hidrodinâmicos, etc., verificam-se constantes mutações dos fundos marinhos, com particular incidência nas zonas costeiras, nas águas interiores, nas barras e nos locais onde ocorre maior interação dos diferentes fatores potenciadores de dinâmica. Estes são os pontos em que se verifica maior necessidade de serem efetuados levantamentos batimétricos cíclicos no sentido de monitorizar, estudar e prever as evoluções, ou seja, o nível de conhecimento atual não se coaduna com uma mera “fotografia do passado”, ou mesmo com a análise entre movimentos verificados. A materialidade das mutações, a análise das dinâmicas e a procura de dados para estudos científicos e a necessidade de preservação dos ecossistemas, têm potenciado a utilização crescente dos dados obtidos pela tecnologia sonar (os equipamentos recentes permitem detetar a biodiversidade marinha, tanto bentônica com na coluna de água, possibilitando mesmo quantificar e qualificar espécies (Innangi et al., 2016)).

Atualmente, a comunidade científica, os decisores políticos e os diversos setores económicos envolvidos potenciam a necessidade de obter uma sucessão continuada de “fotografias” com intervalos suficientemente curtos, no sentido de conseguirem avaliar e prever as alterações e as interações do maior número de variáveis/parâmetros possíveis, estabelecendo/construindo modelos hidrográficos, capazes de entender e prever mudanças ao longo do tempo, contribuindo assim para a partilha de conhecimento e para a interação de um maior número possível de áreas do conhecimento científico, **procurando assim fazer com que o “filme” tenha um final feliz.**

1.2 | Estado da Arte

Relativamente à abrangência dos levantamentos batimétricos a organização sem fins lucrativos GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), que atua sob os desígnios da International Hydrographic Organization (IHO) e da Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) da UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), formada por um conjunto de cientistas e investigadores marinhos da área da geociência e da hidrografia, definiu como seu objetivo cartografar a maioria do fundo dos oceanos até 2030, propondo-se construir um mapa batimétrico dos oceanos do mundo, com uma resolução de 100 m, o mais atualizado e preciso possível, disponibilizando-o publicamente de forma gratuita. Estes mapas constituirão um grande avanço em termos de exatidão e precisão face à informação batimétrica atualmente disponível (Main, 2016b).

Este objetivo só será possível face aos recentes desenvolvimentos das técnicas de obtenção e análise de dados com tecnologia sonar, principalmente fruto da crescente e contínua melhoria do tempo necessário para a execução dos levantamentos subaquáticos. Um exemplo marcante da evolução do paradigma do tempo necessário à obtenção de dados batimétricos foram os trabalhos de busca pelo avião da *Malaysia Airlines* do voo MH370, pela empresa FUGRO (Edward, 2016). Esta multinacional holandesa pesquisou uma área superior a 208 000 km², com uma resolução de 90 m, em 189 dias. Concluímos então que, ao longo dos anos, **tem vindo a melhorar a eficiência da relação entre a área coberta/pesquisada, o tempo de execução dos levantamentos e a precisão/resolução das pesquisas subaquáticas do fundo do mar, sendo agora possível alcançar o desígnio de mapear todo o fundo dos oceanos.**

A comunidade científica e as corporações tecnológicas têm vindo aperfeiçoar as sondas multifeixe (MBES – MultiBeam EchoSounding), dotando-as de maior precisão, tornando-as mais eficazes e conferindo-lhes maior abrangência, recolhendo dados de toda a coluna de água, do “pisso” à superfície dos oceanos. Novos estudos estão a ser feitos, novas metodologias são esperadas no futuro próximo potenciando a quantidade e a qualidade da informação resultante do recurso à tecnologia sonar. Diferentes abordagens de diversos ramos da ciência estão a usufruir dos dados obtidos com sonares aprofundando e desenvolvendo do conhecimento científico em diferentes áreas.

Em suma, dos atuais levantamentos batimétricos resultam dados cuja qualidade e pertinência permitem que o resultado final vá além das meras cartas de navegação, permitindo alcançar uma melhor compreensão e um conhecimento mais detalhado dos oceanos, com reflexos em áreas económica, política e científica, nomeadamente ao possibilitar: conhecer o fundo dos oceanos (morfologia, dinâmica, biodiversidade), definir critérios para estabelecer os limites das margens continentais, aferir evolução da teoria das placas tectónicas, características da litosfera (detectáveis com equipamentos MBES), nomeadamente da crosta oceânica, identificação de cadeias vulcânicas submarinas, a definição de modelos de circulação oceânica, o estudo das correntes, do *upwelling*, das alterações climáticas, das alterações do nível do mar e da oceanografia biológica, a previsão e propagação de *tsunamis* a identificação e exploração de petróleo e minerais, a análise da biodiversidade marinha, o estudo dos cardumes de peixes e a gestão das pescas, e auxiliar a gestão do ordenamento costeiro.

Relativamente à área de estudo, estuário do Rio Douro, existem muitos estudos relativos aos efeitos da construção dos molhes da Foz do Douro e à evolução da restinga, veja-se, Veloso-Gomes et al. (2009), Santos et al. (2010), Bastos et al. (2012), Bio et al. (2014).

1.3 | Objetivos

Impõe-se estudar a zona estuarina do Rio Douro com principal foco na embocadura e no plano de água envolvente à restinga, avaliar a sua evolução e interrelaciona-la com os principais fatores geradores da dinâmica estuarina, nomeadamente os caudais do Rio Douro, a agitação marítima e as marés, complementando estudos que “versam” sobre as consequências da construção dos molhes na área e volume da restinga e nos efeitos do transporte de sedimentos nas zonas costeiras limítrofes. Neste contexto, o presente estudo pretende obter uma melhor perceção da morfodinâmica do leito na foz do Rio Douro.

Relacionamos os movimentos de sedimentos no leito do Rio Douro e no fundo das zonas costeiras, a evolução das batimetrias, com a construção dos molhes, valorando o caudal efluente do Rio Douro, principalmente ao longo da época das chuvas, os efeitos da agitação marítima, os efeitos das marés e aferindo a existência de outros eventuais condicionantes.

Considerando os recorrentes cenários de cheias do Rio Douro, é importante analisarmos a capacidade do transporte da água do estuário para o Mar, estudar a evolução dos volumes da coluna de água, procurando identificar e caracterizar processos de transporte e deposição de inertes, definir impactos nos ecossistemas locais, aferir a necessidade realização de novos estudos no sentido de vir a estabelecer limites máximos de área e volumes ideais para a restinga e, tendo em conta fruto a crescente importância económica na navegação, aferir efeitos e projetar tendências de eventuais movimentos de sedimentos no canal de navegação.

Pretendemos também desenvolver uma metodologia que sistematize os procedimentos necessários à realização de levantamentos batimétricos em zonas de baixa profundidade, estuarinas e costeiras, com sondas de feixe simples. Consubstanciando, visamos definir critérios para validar os dados em bruto dos levantamentos por nós realizados, aferir a precisão dos equipamentos utilizados, definir metodologias de análise de dados, integrar os dados de profundidade com os dados de posicionamento horizontal de precisão, estabelecer critérios e métodos de interpolação que se adaptem a zonas estuarinas.

CAPÍTULO 2 | ÁREA DE ESTUDO

O rio Douro nasce na serra de Urbion (Cordilheira Ibérica), a cerca de 1.700 m de altitude. Ao longo do seu curso de 927 km (o terceiro maior entre os rios da Península Ibérica, depois do Tejo e do Ebro) até à foz no Oceano Atlântico, junto à cidade do Porto, atravessa o território espanhol numa extensão de 597 km e serve de fronteira ao longo de 122 km, sendo os últimos 208 km percorridos em Portugal. A bacia hidrográfica do rio Douro tem uma área total de 97.603 km², dos quais 18.643 km² em Portugal (19% do total) e 78.960 km² em Espanha (81%), ocupando o primeiro lugar em área entre as bacias dos maiores rios peninsulares (APA, 2016).

O rio Douro é o único rio português que conserva, até à foz, as suas escarpadas vertentes de canhão, sem que, ao contrário dos outros rios portugueses, forme um estuário amplo e pouco profundo quando chega ao litoral.

As suas águas provocam a erosão dos montes e terras que atravessam, e arrastam aluviões que se vão depositar ao longo da costa, ajudando a formar as praias arenosas. Calcula-se que, antes da construção das barragens e da extração de areias no leito do rio, o Douro traria até à costa 1 a 2 milhões de m³ de areia por ano. Depois da construção da última barragem estima-se que esse transporte tenha ficado pelos 250.000 m³/ano (Veloso-Gomes e Sena, 2003). As cheias do Rio Douro estão associadas a grandes fluxos de água, com rápida propagação e uma forte elevação do nível da água. Os efeitos das cheias podem ser parcialmente controlados pelas barragens para volumes de água entre os 7.000 m³/s e os 9.000 m³/s.

A construção de barragens reduziu o fornecimento sedimentar para a costa, estimando-se que atualmente as barragens sejam responsáveis pela retenção de mais de 80% dos volumes de areias. Esta redução associa-se não só ao efeito de retenção sedimentar nas albufeiras, mas também à regularização das velocidades, resultante da atenuação das cheias (Santos-Ferreira e Santos, 2014).

O estuário do rio Douro tem 22 km de comprimento, sendo a propagação da maré limitada a montante pela barragem de Crestuma. A penetração salina depende do facto de o caudal do rio não ser contínuo, só sendo atingida a barragem em condições de caudal exceccionalmente baixo, ou nulo, e perante marés de elevada amplitude (Vieira e Bordalo, 2000). O caudal efluente de Crestuma pode em poucos segundos passar dos 0 m³/s aos 1.000 m³/s. Descargas superiores a 690 m³/s fazem com que o estuário seja integralmente composto por água doce, independentemente da maré, verificando-se estratificação para caudais inferiores a 300 m³/s (Azevedo et al., 2008).

Tal como consta na figura 5 a abertura da Barra em 1995 era de 1.110 m, sendo reduzida pelo Cabedelo para apenas 100m (figura 5).



Figura 5 – Estuário do rio Douro em 1995
(fonte: <http://ortos.igeo.pt/ortofotos/>).

Desde 2007, com a conclusão do molhe Sul, um quebra-mar destacado à superfície, a largura do canal na desembocadura do rio Douro passou a ser estável (menor distância entre margens 220 m) tendo na zona dos Pilotos evoluído de 100 m em 1995 para 340 m em 2007 (figura 6).



Figura 6 – Estuário do rio Douro
(fonte: Google Earth – 10 de maio 2013).

2.1 | Caracterização do Estuário do Rio Douro

As duas forças essenciais em ação nos estuários são as correntes fluvial e das marés. A importância da corrente fluvial depende, como é evidente, do seu caudal e da sua velocidade. Para o presente estudo a dinâmica fluvial foi quantificada com base nos caudais diários efluentes da barragem de Crestuma-Lever (localizada ao km 20,4 da foz, considerada o limite do estuário).

Dinâmica e hidrologia dos estuários

A corrente fluvial é contrariada pela força da maré enchente. De forma oposta, a maré de vazante vai potenciar a força da corrente. No máximo da maré alta, o nível do mar é mais elevado que o nível da água no rio. Daí a penetração da água do mar ao longo do rio, ou enchente (com formação de uma cunha salina). Pelo contrário, no máximo de maré baixa, o nível da água é bastante mais alto no rio que no mar, porque à água do rio se juntou a água marinha que nele penetrou durante a enchente, originando uma descarga, durante a vazante, que pode atingir velocidades elevadas.

Quer durante a maré baixa quer durante a maré alta não há corrente alguma e a água está praticamente parada. É nos momentos em que a maré está no seu ponto médio que se atingem as velocidades mais elevadas. Este facto tem importantes consequências em termos de sedimentação, já que a ausência de corrente durante a maré alta vai produzir a deposição de sedimentos transportados em suspensão ou resultantes da floculação de argilas em contacto com as águas marinhas ricas em iões.

Se numa situação de cheia coincidirem marés altas vivas e uma sobre-elevação meteorológica do tipo *storm surge*, o rio não consegue escoar a água que transporta. Esta vai-se acumulando, fazendo subir o respetivo nível no estuário, originando cheias.

Esse fenómeno pode ser particularmente intenso em rios que se mantenham encaixados até perto da foz, porque num vale estreito a cheia tem tendência a subir mais rapidamente, como é o caso do rio Douro (Almeida, 2013).

Aos estuários chegam os nutrientes e a matéria orgânica que os rios transportam. Por isso os ecossistemas estuarinos são dos mais produtivos do Planeta. Foi para aproveitar essa produtividade, nomeadamente a grande riqueza em peixe (sável, lampreia, enguia, etc.) e em bivalves (berbigão, por exemplo) que desde tempos imemoriais o homem se fixou junto aos estuários.

Os estuários têm ainda, uma função importantíssima na manutenção dos recursos piscícolas, já que funcionam como verdadeiras “maternidades”. É nos estuários, que muitos peixes desovam e se desenvolvem nas primeiras fases de vida, antes de se aventurarem nas águas mais profundas e agitadas do oceano. Podemos afirmar, sem

receio, que a pesca costeira depende em grande parte dos estuários, rias e lagoas do litoral.

O estuário está no encontro de dois ecossistemas diferentes: um de água doce (o rio) e outro de água salgada, o ecossistema marinho. Sujeito à influência das marés, as águas do estuário vão variando o seu grau de salinidade e a sua profundidade. Os aluviões que o rio arrasta sedimentam em grande quantidade nas águas calmas do estuário, formando bancos de areia que cobrem e descobrem com as marés. Uma formação típica dos estuários são os sapais, formações aluvionares periodicamente alagadas pela água salgada e ocupadas por vegetação halófitica, como o da Baía de São Paio. (APA, 2016)

Movimentação dos sedimentos nos estuários

Parte dos materiais mais grosseiros que são transportados pelos rios por rolamento ou arrastamento ficam na parte interior do estuário porque a perda de velocidade devida à diminuição do declive diminui a capacidade de transporte sedimentar do rio. As areias conseguem caminhar mais para jusante, mas o avanço da cunha salina dificulta a sua progressão. (Azevedo et al., 2008).

Na maior parte dos estuários existe uma zona onde os sedimentos finos em suspensão estão muito concentrados – o corpo lodoso). Este núcleo de sedimentos vasosos em suspensão resulta da floculação das argilas em contacto com as águas salinas que circulam para montante ou para jusante de acordo com as marés. Situa-se próximo do ponto nodal que é o ponto de convergência onde se anulam as correntes de fundo que sobem o estuário e a corrente fluvial que desce ao longo dele. Atualmente, com a urbanização e industrialização das margens dos rios, uma parte do corpo lodoso é constituída por poluentes, pelo que o seu estudo tem um grande interesse prático. Nas épocas de cheia os resíduos poluentes depositados no estuário podem ser lançados para o mar, integrando a pluma turbida. A decantação da água turva acontece sobretudo durante os períodos em que se dá a sua imobilização, que coincidem sobretudo com as marés altas. A capacidade de aderência de que gozam as partículas de dimensão inferior à das areias ($\leq 2 \mu\text{m}$) faz com que, uma vez depositadas, seja difícil remobilizá-las. Esse facto permite que as acumulações vasosas se vão repetindo em cada ciclo de maré e, por isso, acabem por ser uma importante forma de sedimentação estuarina (Gomes et al., 2006).

2.2 | Molhes do Rio Douro

Tendo em conta a importância do transporte marítimo de mercadorias e, com o objetivo de melhorar as condições de navegação (figura 7), desde o século XVIII que se

constroem estruturas na foz do Douro: o molhe do Touro em 1790 (base do molhe Norte); o molhe de Luiz Gomes de Carvalho concluído em 1820 (com 600 m de comprimento, que estabelece uma separação clara entre a Baía de São Paio e o canal do estuário) (figura 8); o molhe de Felgueiras em 1886 (praticamente paralelo ao molhe Norte).

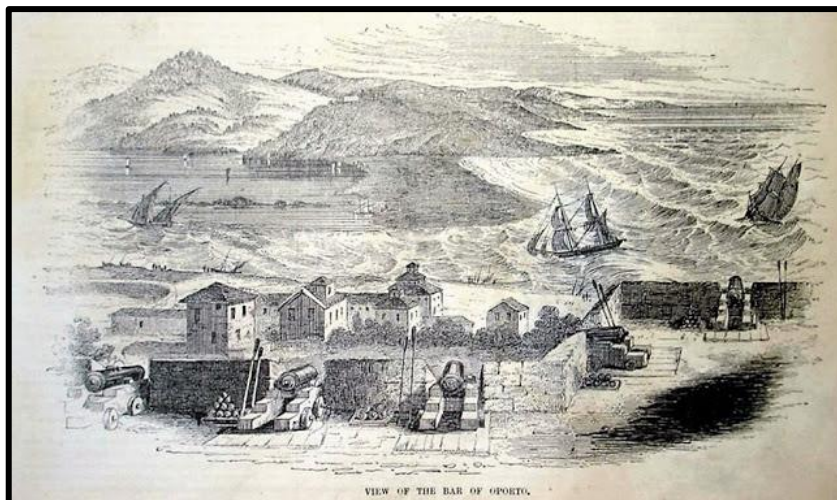


Figura 7 – Perigos da entrada na Barra do Douro, 1855, View of the Bar of Oporto.

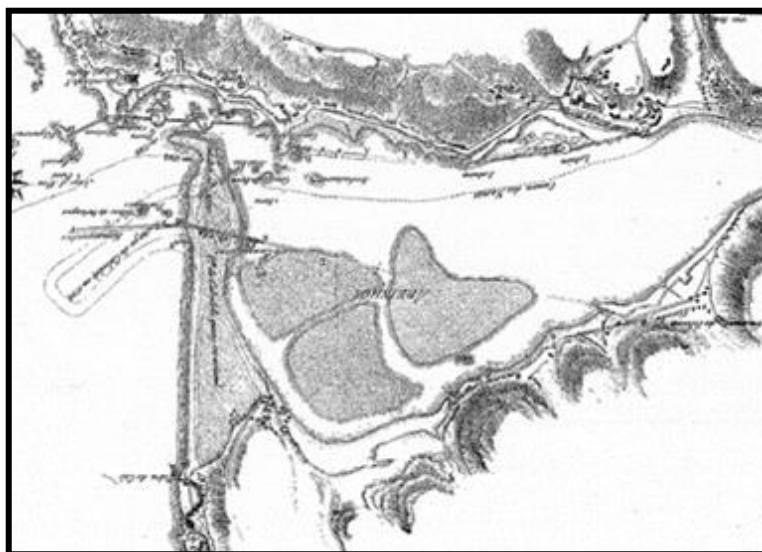


Figura 8 – Planta da Foz do Douro, Plano de melhoria da Barra do Porto, Eng.^o Luís Gomes de Carvalho, Corpo de Engenheiros, 1820.

Com o objetivo de melhorar a acessibilidade e segurança da Barra do Rio foram construídos dois molhes no Douro entre abril de 2004 e março de 2009: molhe Norte com 350 m e uma extensão de enraizamento de 200 m para terra e 7 m de altura acima do nível médio da água do mar; molhe Sul, um quebra-mar destacado, de baixa cota de coroamento, galgável, exteriormente protegido por blocos de betão enriquecidos por minério de alta densidade, com 450 m de extensão (figura 9) (IPTM, 2003).



Figura 9 – Imagens aéreas molhes do Rio Douro
(fonte: http://www.icsa.pt/client/skins/a_negocio.asp?page=28).

Relativamente aos efeitos produzidos pela construção dos molhes, Veloso-Gomes et al. (2009) referem que “antes do início da construção do quebra-mar havia um comportamento um pouco aleatório da restinga” sendo a “tendência geral (...) o recuo da posição da linha de água (...) e diminuição do volume”, mas após a construção do quebra-mar a restinga cresceu e estabilizou.

Nos meses mais secos, a sedimentação é dominada pelos agentes marinhos (marés no Verão e a ondulação com o aproximar do Inverno), enquanto nos meses mais chuvosos predomina a ação das correntes fluviais.

No mesmo sentido Bastos et al. (2012) concluem que antes da construção dos molhes a erosão do Cabedelo estava relacionada com as fortes correntes do rio Douro, principalmente em épocas de cheia, e a acreção com a ocorrência de fenómenos de vento extremos e as alterações de volume com condições extremas de ondulação. Após a construção dos molhes estas correlações deixaram de se verificar.

Bio et al. (2014) concluem que após a construção dos molhes a forma da restinga estabilizou, tendo aumentado a sua área e o seu volume. De igual forma Santos et al. (2010) referem que o fenómeno de contínua redução do Cabedelo foi interrompido com a construção dos molhes do Rio Douro, tendo estes assegurado estabilização do Cabedelo.

Relativamente à navegabilidade do Douro Veloso-Gomes et al. (2009) referem que após a construção dos molhes “não se verificaram assoreamentos significativos no canal de navegação, ao contrário do que acontecia no passado, em que era necessário recorrer a dragagens frequentes” concluindo que “o efeito de corte do transporte sedimentar (...) está a resultar.”

2.3 | Restinga

A restinga é uma grande formação arenosa que separa o estuário do Douro do oceano, situada na margem Esquerda (a Sul) do estuário do rio Douro e que se formou por acção das correntes litorais (figuras 10 e 11).

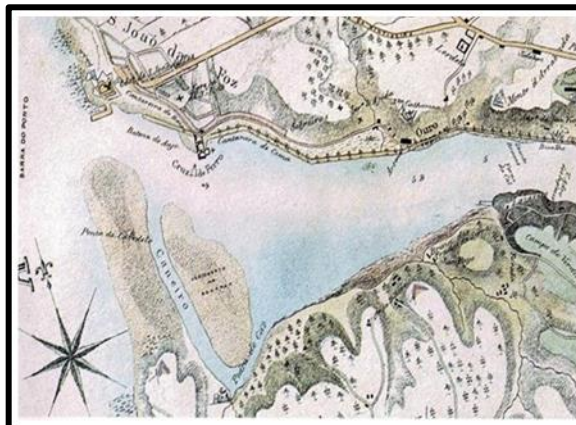


Figura 10 – Litografia – Planta do Porto e suas Vizinhanças /A.Mip Alvis deli, 1829 London: Dean J. Murray Lithographers.

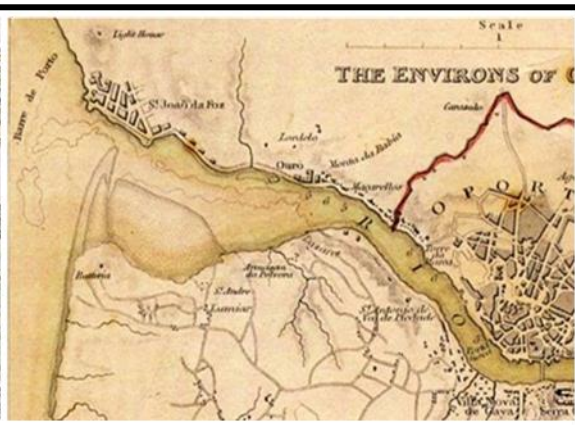


Figura 11 – Carta de 1833, impressa em Inglaterra apresenta preocupações relativas à navegabilidade do Rio Douro, definindo um “canal”.

Para além das variações cíclicas, sazonais de área, volume e forma, fruto dos elevados caudais fluviais, da ondulação e da ação do vento, a restinga sofreu alterações de longo-prazo, com uma tendência clara para o recuo da restinga para montante do Rio Douro (figura 12).

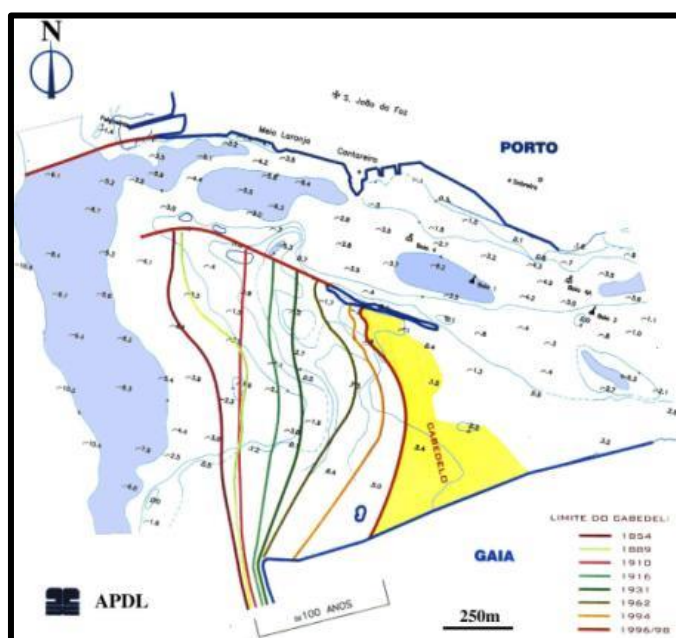


Figura 12 – Evolução do Cabedelo nos últimos 150 anos
(fonte: Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, APDL).

Desde meados do séc. XX que era notório um progressivo recuo do Cabedelo para o interior do estuário, motivado pela diminuição da frequência e intensidade das cheias do

rio, pela diminuição do transporte de sedimentos e pela extração de areia no estuário. Este fenómeno levanta problemas de segurança para as populações ribeirinhas de Gaia e Porto, já que o Cabedelo as defende das investidas do mar durante as tempestades. A total destruição, por ação do Homem, da flora que fixava as dunas do Cabedelo contribuiu, também, para a sua instabilidade (Granja et al., 2011). Desde a construção do molhe Norte do Porto de Leixões (anos 60), diminuiu o transporte de areia ao longo da costa, de Norte para Sul. Por sua vez, com a construção de sucessivas barragens, tendo sido a última barragem do Douro (Crestuma/Lever) construída nos anos 80, a alimentação do Cabedelo com as areias transportadas pelo rio diminuiu drasticamente (Granja et al., 2011).

Por ação do homem, com a construção dos molhes na foz do rio Douro (2004-2009) a restinga deixou de sofrer tantas variações, tornando mais estável a sua forma, tendo vindo a gradualmente aumentar quer a sua área quer o seu volume (Teodoro et al., 2014).

Com base na recolha contínua de dados topográficos na restinga, cofinanciada pela Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL) e analisada pelo CIIMAR (Bastos et al. 2012, dados mais recentes fornecidos pela APDL e CIIMAR) compilaram-se dados relativos à área e volume da restinga, calculados para 1 m acima do NMM, tabela 1.

Tabela 1 – Quadro resumo com evolução da altura, da área e do volume da restinga.

Data	Altura Máx. (m)	Δ Alt.(m)	Δ Alt.(%)	Área (m ²)	Δ Área(m ²)	Δ Área(%)	Volume +1NMM (m ³)	Δ Vol.(m ³)	Δ Vol.(%)
Maio 2002	9,99			261.143			1.069.734		
Março 2007	9,30	-0,70	-7,0%	233.158	-27.985	-10,7%	923.054	-146.681	-13,7%
Fevereiro 2012	9,82	0,52	5,6%	301.359	68.201	29,3%	1.319.875	396.822	43,0%
Março 2015	10,10	0,29	2,9%	322.125	20.766	6,9%	1.561.849	241.974	18,3%
Março 2016	10,20	0,10	1,0%	324.771	2.646	0,8%	1.631.094	69.245	4,4%
Março 2017	10,02	-0,18	-1,8%	341.494	16.723	5,1%	1.650.540	19.446	1,2%
Δ em Quinze Anos		0,02	0,2%		80.351	30,8%		580.806	54,3%
Δ em Dez Anos		0,72	7,7%		108.336	46,5%		727.487	78,8%

Comparando a evolução temporal da altura máxima, da área e do volume da restinga concluímos que, entre 2002 e 2017, em quinze anos verificou-se um aumento de todos os indicadores em análise (altura máxima: + 2 cm (0,2%); área: 80.351 m² (30,8%); volume: 580.806 m³ (54,3%)). Da análise ao período após a construção dos molhes, de 2007 a 2017, concluímos por um aumento da área de 46,5% e do volume para 78,8% (altura máxima: + 72 cm (7,7%); área: 108.336 m² (46,5%); volume: 727.487 m³ (78,8%)).

Procedendo a uma análise de regressão linear concluímos que, de 2002 a 2017, em 15 anos se verificou um aumento médio ano do volume da restinga de aproximadamente 38.720 m^3 (3,6 %) e de 2007 a 2017, em 10 anos, um aumento médio ano do volume da restinga de aproximadamente 72.749 m^3 (7,9%).

Em suma, de 2004 a 2009 foram construídos os molhes do Douro, infraestrutura que produziu efeitos na hidrodinâmica do rio Douro, na evolução da sua restinga, designada Cabedelo, que no curto prazo diminuiu os efeitos das cheias no rio Douro e melhorou a navegabilidade da sua Barra (figura 13).



Figura 13 – Evolução recente do Cabedelo 2003 a 2016
(fonte: Google Earth 2017).

2.4 | Evolução dos Caudais

No sentido de aferir a evolução dos caudais do Rio Douro, de forma a quantificar a dinâmica fluvial, foi analisado o caudal efluente médio diário (m^3/s) da barragem de Crestuma-Lever (estação 07G/01A) de janeiro de 2000 a julho de 2017.

Na análise aos dados recolhidos verificou-se a existência de dias sem informação disponível, tendo as lacunas sido ultrapassadas atribuindo a esses dias valores médios dos dias dentro desse mês com dados objetivos.

2.5 | Agitação Marítima

Sendo a agitação marítima um dos fatores potenciadores da movimentação de sedimentos imponha-se identificar e circunscrever temporalmente as datas e a intensidade da ondulação.

A média da altura significativa das ondas situa-se entre 2 e 3 m, cujos períodos variam entre 8 e 12 s. Em tempestade verificam-se ondas com alturas significativas superiores a 8 m, com períodos entre ondas a atingem períodos entre os 16 a 18 s. A direção predominante da ondulação é Noroeste com episódios de tempestade de sudoeste (Coelho et al., 2009).

Considerando as datas em que foram executados os levantamentos batimétricos procedeu-se à análise da agitação marítima no período de 1 de outubro de 2016 a 30 de junho de 2017. Com esse fim foram analisados os dados da boia ondógrafo de Leixões, do Instituto Hidrográfico. Os sensores destas boias medem a aceleração vertical do movimento da superfície livre do mar, o que permite obter informação relativa à altura, ao período das ondas e à direção de propagação das ondas. Foram objeto de análise os seguintes parâmetros: altura significativa (H_s (m): Média do terço mais elevado das alturas de onda que foram registadas durante o período de observação. Corresponde aproximadamente à avaliação visual da altura das ondas); altura máxima (H_{\max} (m): Máxima altura de onda registada durante o período de observação), período médio (T_{hs} (s): período da altura significativa. Média dos períodos correspondentes às ondas que foram utilizadas no cálculo da altura significativa (H_s)) e direção da ondulação de pico ($Thpt$ ($^\circ$): média associada ao período de pico medida a partir do Norte).

2.6 | Sedimentos na Baía de São Paio

Em dezembro de 2007, foi criada a Reserva Natural Local do Estuário do Douro, com o objetivo de proteger aves e a paisagem local. A reserva serve de refúgio a aves migradoras, como a garça-real e o corvo-marinho, de nidificação a limícolas, como o peneireiro. A reserva desempenha também um papel de maternidade para espécies piscícolas de importância comercial, como a solha e enguia, ou ambiental, como os

góbios, integrando ainda um sapal, populações de bivalves e diversa vegetação dunar. As areias intertidais absorvem o excesso de nutrientes oriundos de montante, funcionando como estações de depuração da água estuarina, retendo também os lodos com metais pesados e outros poluentes. A reserva A Reserva Natural Local do Estuário do Douro pode ser classificada como um ecossistema de rara diversidade, tendo em maio de 2012 passado a integrar a Rede Nacional de Áreas Protegidas. Os limites da reserva são coincidentes com os limites da Baía de São Paio, abrangendo parte da restinga.

Com o objetivo de perceber as variações de pequena escala verificadas na área intertidal da Baía foram fixadas três estacas graduadas em locais pré-estabelecidos dentro da área da Reserva natural a Baía de São Paio (figura 14), com 4,20 m de altura.



Figura 14 – Fotografias da instalação de 3 estacas, no dia 13 de janeiro de 2017, na Baía de São Paio.

As estacas foram colocadas em baixa-mar a aproximadamente um metro de profundidade, estabilizadas através de pedras transportadas para o local e colocadas junto às bases das estacas, sendo posteriormente cobertas de areia de forma a manter o nível do solo pré-existente. Os três pontos definidos correspondem a pontos na zona intertidal: dois em locais próximos do limite exterior da Reserva a Baía de São Paio e um ponto mais no interior da área da reserva (figura 15).



Figura 15 – Localização das estacas métricas dentro do limite da Reserva Da Baía de São Paio. Passados dois dias foi registada a primeira leitura da escala graduada das estacas, tendo posteriormente sido efetuadas pelo menos três leituras mensais do nível dos sedimentos, de forma a avaliar oscilações e as tendências de evolução dos sedimentos da zona intertidal da Baía de São Paio entre 15 de janeiro a 31 de julho (figura 16).



Figura 16 – Imagens das estacas no decurso do processo de recolha de leituras da variação dos sedimentos.

As estacas, pontos fixos georreferenciados cuja altura é superior à oscilação máxima da maré, também tiveram como fim permitir o controlo em preia-mar do nível da água, fornecendo dados de profundidade real, permitindo aferir a exatidão das leituras da profundidade obtidas nos varrimentos efetuados com o sonar, assim quantificando discrepâncias entre as profundidades reais e as resultantes das sondas.

CAPÍTULO 3 | BATIMETRIA

Antigamente a batimetria era obtida manualmente, realizando medições diretas, usando cabos graduados com pesos. Com a evolução da tecnologia do som subaquático, emissão e leitura dos ecos, os dados relativos à profundidade passaram a ser obtidos através da utilização de sonares de feixe simples e, mais recentemente, multifeixe.

Com a evolução dos métodos óticos de deteção remota e da análise do espectro da luz visível, nomeadamente com recurso à tecnologia LiDAR, passou a ser possível obter dados batimétricos, método com particular interesse nas áreas costeiras de menor profundidade, permitindo complementar a tecnologia sonar.

3.1 | Tecnologia sonar

O som (as ondas acústicas) é o veículo mais eficiente para transmitir informação no ambiente subaquático. Uma vez que a água é mais densa do que o ar, o som propaga-se através da água quatro a cinco vezes mais rápido. O som também percorre distâncias maiores debaixo de água, pois há menos atenuação na água comparativamente ao ar (Lurton, 2010).

Conhecendo a velocidade do som na água, da medição do tempo da viagem bidirecional do percurso das ondas acústicas entre a fonte emissora (o transdutor) e o fundo do mar e o regresso à fonte novamente, obtém-se a distância entre o alvo (o fundo) e o transdutor do sonar, sendo assim obtida a profundidade. A análise à intensidade do retorno do impulso sonoro (*backscatter*) possibilita ainda obter informações sobre as propriedades do fundo (por exemplo, composição do sedimento, espessura), ou mesmo sobre a composição da coluna de água.

O desenvolvimento da tecnologia acústica subaquática melhorou a qualidade e quantidade dos dados disponíveis, potenciando a obtenção de conhecimento, que se tem vindo a traduzir num crescimento do conhecimento necessário às atividades marítimas e à exploração dos oceanos.

As tecnologias mais recentes como sonares multifeixe permitem obter uma total cobertura dos fundos marinhos, uma grande densidade de pontos, obtendo dados de forma mais célere e garantindo uma elevada resolução com exatidão submétrica. As recentes evoluções tendem igualmente para uma clara diminuição dos custos por área pesquisada e para uma eficiência crescente na obtenção de dados brutos (Lurton, 2010).

A tecnologia sonar (SOund NAvigation and Ranging), determinação da distância pelo som para efeitos de navegação, foi inicialmente desenvolvida como forma de localizar

submarinos inimigos durante a Primeira Guerra Mundial. A análise dos ecos dos sons foi uma das primeiras formas utilizadas para determinar profundidades e assim mapear o fundo do mar. Com o desenvolvimento desta tecnologia cada vez mais o sonar é uma forma de "ver" o que está por baixo da superfície dos oceanos. Os sonares passivos captam e analisam sons que recebem (por exemplo produzidos por navios, por atividade vulcânica subaquática, por *tsunamis*, etc.). Os sonares ativos emitem pulsos sonoros, que refletem no fundo ou em objetos em suspensão, cujos ecos são captados pelos transdutores. Os sinais emitidos, de acordo com a qualidade, detalhe do levantamento a efetuar, e a profundidade do local podem ter frequências acústicas infrasónicas até ultrassónicas. Pelo menos três tipos de sonares ativos podem ser usados para obter ecos de "profundidade" usando impulsos de som: sondas de abertura lateral (SSS – Side Scan Sonars), sondas de feixe simples (SBES – SingleBeam EchoSounders) e sondas de feixe múltiplo (MBES – MultiBeam EchoSounders).

Para levantamentos batimétricos são apenas utilizados transdutores de sonar ativos que emitem um sinal acústico ou pulso sonoro (geralmente chamados *pings*) de um transmissor no navio, transdutor, para dentro da água. Quando o caminho do pulso sonoro atinge um objeto, no seu percurso subaquático, o som é refletido e volta em forma de "eco" no sentido do transdutor do sonar. O transdutor recebe estes sinais, determina o tempo entre a emissão do pulso sonoro e sua receção, quantifica a sua força, o alcance e a orientação do objeto. (Mann, 2013)

A utilização da tecnologia sonar tem vindo a ser potenciada, tendo como principais utilizações a elaboração de cartas de navegação, mapas náuticos, deteção e caracterização de perigos subaquáticos para a navegação (ex.: destroços de naufrágios, *pipelines*, cabos subaquáticos).

Teoria Acústica

À medida que o pulso sonoro passa pela coluna de água, no plano vertical, ocorre refração. A velocidade da frente da onda acústica varia com base na velocidade do som, sendo a velocidade de transmissão e retorno do som na água determinada pelas características do volume da água e pela densidade da massa alvo do pulso.

Velocidade do som

O volume da água influencia as ondas acústicas, fruto da variação dos parâmetros: temperatura, pressão (profundidade) e a condutividade (impurezas dissolvidas, geralmente salinidade). Estes parâmetros são razoavelmente constantes quando estamos perante temperaturas, concentrações de salinidade e variações de profundidade

sem grandes oscilações. No entanto, na persecução da precisão devem ser tidas em consideração estas variações. (IH Portugal, 2010).

Principalmente nas zonas costeiras a temperatura é o fator que mais influencia a velocidade do som na água. Uma variação de 1º C provoca aproximadamente uma alteração de 4 m/s na velocidade do som. Passada a camada superior dos oceanos a temperatura normalmente diminui. Os principais fatores que influenciam a temperatura são: aquecimento solar, arrefecimento noturno, chuva, os afluentes e o *upwelling*.

A pressão tem particular influência na velocidade do som em áreas de maior profundidade. Cada aumento de 100 m de profundidade (acréscimo de pressão de 10 atm) corresponde a um aumento da velocidade do som de 1,7 m/s.

As alterações de condutividade da água estão geralmente associadas à salinidade. O som “viaja” mais lentamente na água doce do que na água do mar. Uma mudança na salinidade, através de: evaporação, precipitação, fluxos efluentes de água doce de rios ou variações das marés, originará mudanças de densidade que afetam a velocidade do som. Como regra geral, uma mudança na salinidade de apenas 1 ppt pode causar uma alteração de velocidade do som de 1,4 m/s.

Perdas de Transmissão

Após a emissão do pulso sonoro ocorrem perdas de transmissão, para além das resultantes do percurso, provocadas por pequenos objetos/partículas na coluna de água ou no fundo, que causam interferências que geram perdas, diminuindo a energia acústica dos ecos recebidos pelo transdutor quer por dispersão quer por absorção.

A perda por dispersão representa a redução da densidade, a energia do pulso sonoro é espalhada por uma área da superfície progressivamente maior à medida que a profundidade aumenta. A emissão de feixes estreitos minimiza a dispersão acústica dos sonares ativos (Brennan, 2009).

A absorção é um dos fatores-chave na atenuação da energia acústica. Quanto maior a frequência, maior é a absorção. Quanto maior a frequência selecionada para a emissão dos pulsos do sonar, maior é a vibração (a excitação) das partículas na água, originando maior transferência de energia acústica, levando à atenuação da onda acústica. Por essa razão, frequências mais baixas são usadas para obter dados mais profundos. A 400 kHz (kilohertz), a absorção normal da água do mar é de aproximadamente 100 dB/km, enquanto a 200 kHz a absorção é de aproximadamente 50 dB/km. Estes são valores para

a água do mar normal (com uma salinidade de 35 ppt). Em água doce a absorção é consideravelmente menor porque a salinidade é menor ($<0,5$ ppt). (NOAA, 2014)

Todas as partículas suspensas na coluna de água, os peixes e outras matérias, que se encontrem entre a superfície e a superfície do fundo do mar vão espalhar a onda acústica, originando dispersão da energia acústica. Sempre que a onda sonora se espalha verifica-se reverberação, replicação do eco. A principal consequência da reverberação é a perda de energia acústica, o que origina perdas de transmissão. O som ao refletir e dispersar replica o eco, afetando a propagação do som, consequentemente aumentando a perda entre o sinal emitido pelo transmissor e o sinal recebido pelo recetor do transdutor do equipamento sonar. A reverberação divide-se em três áreas principais: reverberação da superfície do mar, reverberação do fundo do mar e a reverberação da coluna de água (fruto da passagem da energia pelo corpo de água).

Ocorre reverberação da superfície do oceano em função do estado do mar, principalmente quando se verifica ondulação de superfície provocada pelo vento, ou quando a ondulação de superfície quebra e provoca a existência de bolhas de ar junto à superfície. Pelos mesmos fatores, a superfície do mar também reflete a energia acústica que não é captada pelo recetor do transdutor, o que pode originar que um *ping* produza diversos ecos, ou seja, uma mesma onda acústica pode resultar na replicação de vários ecos no fundo do mar (duas ou mesmo três vezes). Seguindo o mesmo mecanismo dos ecos principais, os ecos secundários podem ser registados pelo sonar. A informação contida nestes ecos é válida, no entanto refira-se que estes ecos possuem uma energia acústica inferior, visto que resultam de replicações de ecos refletidos aleatoriamente pela superfície do mar para o fundo do mar, voltando a atravessar toda a coluna de água, até se transformarem em novos ecos. (IH Portugal, 2010)

Na reverberação do fundo do mar, a forma como a onda acústica é espalhada é crucial para a qualidade do respetivo eco, dependendo do tipo de fundo (composição e rugosidade), do ângulo de incidência do pulso acústico e da frequência escolhida para a operação do sonar.

Estes três fatores (tipo de fundo, ângulo de incidência do pulso e frequência do sonar) condicionam igualmente a absorção da onda acústica. Quanto maior a frequência ou quanto maior o ângulo de incidência maior será a absorção. Relativamente ao tipo de fundo, um fundo de lama absorve mais energia acústica do que um fundo rochoso, e quanto maior for a quantidade de energia acústica absorvida menor é a quantidade disponível para ser refletida de volta para o recetor da sonda.

Relativamente à coluna de água, as perdas de transmissão são provocadas maioritariamente pela incidência da onda acústica em partículas flutuantes – sedimentos

e outras partículas suspensas que farão com que a onda acústica seja espalhada, conduzindo a perdas de transmissão (Brennan, 2009).

No processo de espalhamento da onda acústica, após sua incidência num objeto ou partícula, existe sempre uma percentagem de energia que é refletida de volta ao sonar, eco do pulso – reflexão (*backscatter*). Os sonares também conseguem medir o grau de energia sonora espalhada durante a transmissão e que não vai originar ecos válidos.

Quem define e executa a pesquisa deve ter conhecimentos e autonomia para ajustar procedimentos, ou os parâmetros operacionais, ajustando a frequência do sonar às condições meteorológicas, à profundidade do local da pesquisa e ao nível de detalhe que se propõe obter, adaptando o sistema às condições da pesquisa (por exemplo, aumentar a potência de transmissão ou o comprimento do pulso para obter mais energia total na água). A definição da frequência do pulso do sonar irá alterar os níveis de absorção e de espalhamento. Em algumas circunstâncias, para obter mais medições da energia refletida dissipada pela absorção do fundo do mar ou durante a dispersão na coluna de água, na busca do detalhe, o operador aumenta a absorção com frequências mais altas. Por outro lado, recorre-se a frequências mais baixas em áreas com fundo absorvente (ex: lodo, resíduos orgânicos) ou com grande carga de sedimentos.

Os sonares acústicos são uma técnica não invasiva, sendo o sinal acústico produzido apenas detetável por mamíferos marinhos, isto se forem emitidas pelo sonar frequências superiores a 120 kHz e, cumulativamente, se a onda acústica do pulso vertical à coluna de água for coincidente com a rota dos mamíferos marinhos

SingleBeam EchoSounders (SBES)

A sonda de feixe simples ou SBES (técnica inventada por Herbert Grove Dorsey em 1928) permite a obtenção de dados de profundidade e das informações dos ecos a partir de pulsos (*pings*) de sonar emitidos num só feixe. A onda acústica verifica perdas de transmissão e absorção ao encontrar um obstáculo e é parcialmente refletida, invertendo a sua direção, sendo o respetivo eco lido pelo recetor da sonda. Da medição do lapso temporal entre a emissão do *ping* pelo transdutor e o retorno do eco é calculada a distância a que se encontra o objeto ecoado.

Um *ping* mais não é do que um impulso elétrico emitido pelo transdutor do sonar que origina uma onda acústica que percorre a coluna da água. Quando a onda de som alcança um obstáculo no seu caminho, retorna. Esse eco faz o caminho de volta ao transdutor, que o capta e transforma novamente num sinal elétrico, que é amplificado e interpretado pelo sonar (Lecours et al., 2016).

Os transdutores devem permitir captar uma grande diversidade de amplitudes de impulsos, para que sejam convertidos no maior número de espectros dos impulsos de energia sonora recebidos, processando quer os ecos mais fortes quer os mais fracos. A profundidade resulta então da medida de metade da distância, metade do intervalo de tempo entre a emissão do pulso e o retorno do eco, claro está, tendo em conta a velocidade do som na água (aproximadamente 1.463 m/s). Portanto, o valor de profundidade corresponde à diferença entre o tempo de emissão da onda acústica pelo transdutor e o retorno do pulso/eco sonoro. A medida da distância é obtida multiplicando a metade do tempo do pulso de saída do sinal ao seu retorno, pela velocidade do som na água. Este é um processo contínuo repetido inúmeras vezes por segundo, de modo a que da pesquisa resulte uma linha contínua de insonorização do fundo marinho.

No sentido de garantir o bom desempenho de um equipamento sonar, este deve ter um grande poder transmissor, o que aumenta a probabilidade de obter ecos de retorno em áreas de águas profundas ou perante a existência de partículas e bolhas de água, permitindo ver detalhes finos; converter a energia elétrica em energia acústica com pouca perda na intensidade do sinal; ser capaz de detetar o retorno dos ecos menores; conseguir processar uma grande gama de sinais; e separar alvos que estão representados próximos em formações distintas, de forma a reconstruir a verdade dos fatos relativamente às batimétricas. A exibição deve ter alta resolução e bom contraste para poder mostrar todos os detalhes de forma clara e detalhada.

Na aplicação da tecnologia sonar para definir a profundidade do fundo do mar, a temperatura, pressão e salinidade são usadas para calcular a velocidade real do som, de acordo com os parâmetros específicos da coluna de água do local a pesquisar. A opção da frequência de trabalho muda de acordo com as condições da pesquisa batimétrica: uma frequência de 200 kHz produz mais detalhes, é mais apropriada para águas com pouca profundidade e permite que a embarcação de pesquisa navegue a velocidades maiores. Uma frequência de 50 kHz ou menor, nas mesmas condições, pode penetrar na água em profundidades mais altas. (IH Portugal, 2010)

Outro fator importante é o ângulo de cobertura: os transdutores de 50 kHz geralmente possuem ângulos de cobertura mais amplos (29° a 52°) que os transdutores de 200 kHz (12° a 22°). Transdutores de 200 kHz com ângulos de cone largo mostram mais do mundo subaquático, à custa da profundidade enquanto os transdutores de 200 kHz com um ângulo de cone estreito penetram mais profundamente do que aqueles com um cone largo, visto que concentram a potência do transmissor numa área menor. Embora um transdutor seja mais sensível dentro do seu ângulo de cone especificado, ele também

pode obter ecos de fora deste cone, eles simplesmente não são tão fortes. (Fairway Danube, 2016)

Grande parte das ecosondas hidrográficas são de frequência dupla, o que significa que um pulso de baixa frequência (50 kHz ou menos) pode ser transmitido ao mesmo tempo que um pulso de alta frequência (200 kHz ou mais). Como as duas frequências são discretas, os dois sinais de retorno normalmente não interferem entre si. O uso da dupla frequência de echosounding permite uma melhor identificação da camada de vegetação, detecção de lama macia ou areia em cima de uma camada de rocha, obtendo simultaneamente diferentes resoluções. A maioria das operações hidrográficas usa um transdutor de 200 kHz, que é adequado para trabalhos costeiros de até 100 m de profundidade. A água mais profunda requer um transdutor de frequência mais baixa (50 kHz) pois o sinal acústico de frequências mais baixas é menos suscetível a atenuação na coluna de água. Uma largura de feixe estreita do transdutor é importante para obter a melhor resolução, especialmente importante em águas profundas, uma vez que a pegada resultante do pulso acústico pode ser muito grande quando atinge um fundo do mar distante.

Muitas melhorias do sistema sonar de feixe simples foram desenvolvidas ao longo do tempo para aumentar o seu desempenho (por exemplo, a ecosonda de feixe dividido com recurso a interferometria para melhorar a precisão dos dados; a ecosonda de feixe duplo que recorre a dois feixes de abertura diferente orientados na mesma direção permitindo assim localizar alvos de forma mais precisa; a sonda de varredura que mais não é do que a combinação de vários SBES montados num suporte horizontal para aumentar o número de sondagens (Lecours et al., 2016).

Embora permaneçam úteis para a navegação, a tecnologia SBES para obter dados batimétricos está desatualizada, tendo sido substituída pela tecnologia de sonar multifeixe, cada vez mais acessível e com novas valências, como o processamento em tempo real. As principais desvantagens do SBES são o tempo e os recursos humanos necessários, levando a uma taxa comparativamente baixa de área pesquisada por dia, o que origina custos de pesquisa muito elevados. Esta relação é ainda pior se a necessidade de detalhe, resolução, da pesquisa for maior.

O sistema MBES é muito mais eficiente e eficaz, permitindo com uma só passagem varrer um conjunto denso de linhas de pesquisa. Fazendo uso do SBES, para cobrir a mesma área, é necessário insonorizar um número muito maior de linhas de pesquisa,

garantir um espaçamento entre os pontos que permita atingir um nível de precisão similar conseguido com MBES. Para mapear os oceanos de todo o mundo com SBES seriam precisos pelo menos cem anos e uma grande quantidade de recursos (navios e mão-de-obra qualificada) tornando-se tal projeto inviável.

No entanto o SBES tem um menor custo de equipamento em comparação com o sistema mais moderno MBES e os dados obtidos não são de desprezar. Vejam-se as publicações recentes de Coggan e Diesing (2011), que analisaram um monte submarino no Canal da Mancha, Elvenes et al. (2014), que mapearam sedimentos superficiais e identificaram habitats e James et al. (2012), que identificaram as características geomórficas em um vale. Horta et al. (2014) concluíram que as ecosondas de laser também podem ser usadas para realizar uma pesquisa batimétrica sendo capazes de medir e monitorar com precisão a batimetria costeira.

MultiBeam EchoSounding (MBES)

Presentemente a sonda de feixe múltiplo ou MBES é a principal técnica utilizada para efetuar levantamentos batimétricos costeiros, possibilitando obter uma cobertura integral do fundo do mar e garantindo um nível de resolução elevado. Estas sondas varrem em cada impulso do sonar uma faixa do fundo do mar, tendo cada feixe de som emitido inúmeras e estreitas ondas acústicas. As sondas MBES atualmente são a ferramenta mais eficiente e precisa disponível para obter dados batimétricos (Costa et al., 2009; Schimel, 2011). Para além de determinarem a profundidade da água, permitem determinar a natureza do fundo do mar e caracterizar a coluna de água (figura 17).

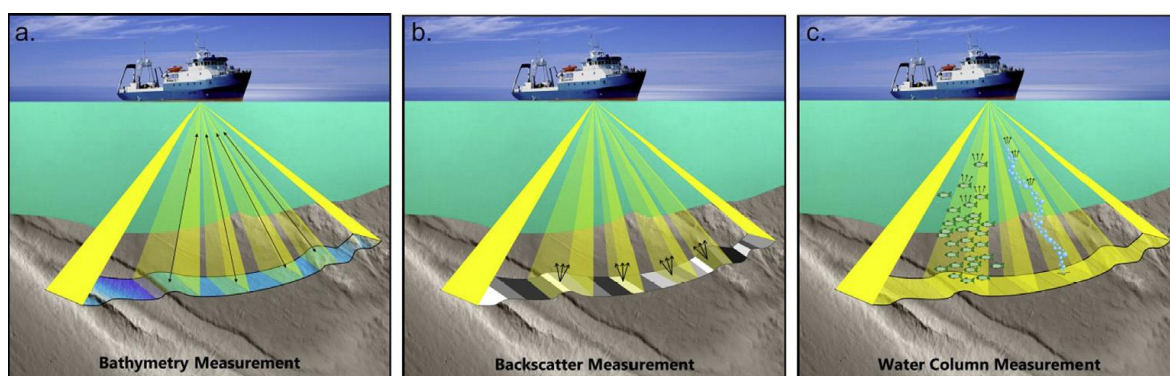


Figura 17 – Diagrama que ilustra os diferentes tipos de dados acústicos que podem ser obtidos por sondas MBES: a) Medição batimétrica; b) Medição do retroespalhamento/reverberação do fundo do mar; c) Espectro da coluna de água (adaptada de Lurton, 2010).

Com a evolução tecnológica das sondas MBES estes sistemas passaram a obter, para além dos dados de profundidade, de interesse para técnicos hidrográficos, engenheiros, geólogos marinhos e navegadores, uma fonte de diversos dados oceanográficos,

despertando o interesse de outras áreas científicas, tais como a oceanografia, arqueologia, biologia, a ecologia (Lecours et al., 2016).

Os sistemas de sonar de feixe múltiplo, inicialmente conhecidos como SASS (Sonar Array Sounding System) foram uma tecnologia desenvolvida nos anos sessenta pela Marinha dos EUA, com o objetivo de permitir mapear grandes extensões do fundo do oceano, de forma a auxiliar a navegação dos seus submarinos (Theberge e Cherkis, 2014).

A partir da década de 1970, empresas como a General Instrument (agora Klein Marine Systems) nos Estados Unidos, Krupp Atlas (agora Atlas Hydrographic) e Elac Nautik (agora parte da L3 Communications) na Alemanha, Simrad (agora Kongsberg Maritime) na Noruega e RESON na Dinamarca desenvolveram sistemas que passaram a poder ser montados no casco de navios civis.

O primeiro sistema multifeixe comercial, instalado em maio de 1977, produzia até 16 feixes com um arco de varrimento de 45 graus. Em 1986 surge a segunda geração de sondas multifeixes que já emitiam até 59 feixes apresentando uma faixa de cobertura de 90 graus. Nos últimos anos, com o desenvolvimento da tecnologia MBES estes sistemas tornaram-se mais eficientes, versáteis e acessíveis, permitindo potenciar a obtenção de dados que abrangem diferentes áreas, aumentando seu uso e nível de interesse.

Os equipamentos MBES modernos transmitem centenas de *pings* estreitos e adjacentes (figura 18), apresentando uma vasta área de cobertura por pulsar, tendo sensibilidade para receber inúmeros ecos de retorno com frequências e intensidades diferentes.

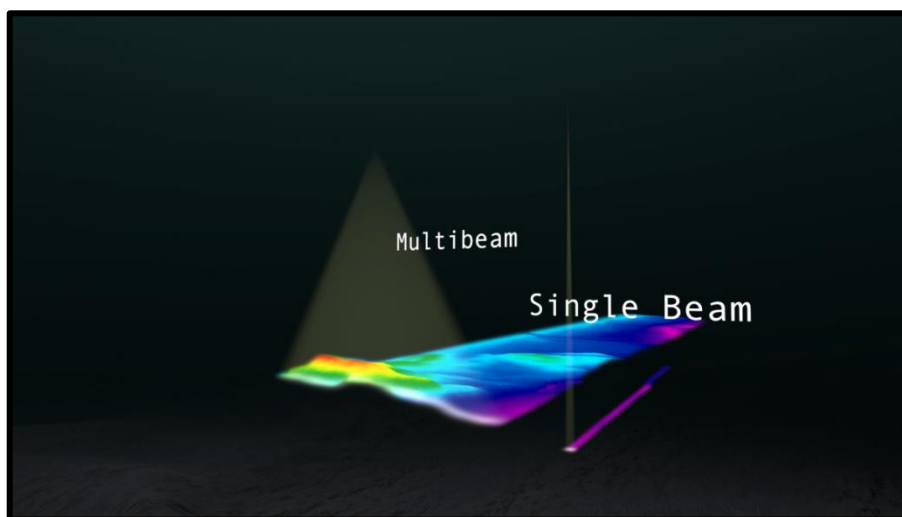


Figura 18 – MBES vs. SBES – Diferença entre um pulso sonar MBES e um pulso sonar SBES (número de feixes, pegada do pulso e varrimento da insonorização do fundo do mar) (adaptado de James, 2015).

Os sistemas MBES analisam a formação dos feixes dos ecos extraíndo informações direcionais das ondas sonoras de retorno, correspondendo a cada *ping* de um feixe

emitido pelo sonar diferentes leituras de profundidade resultantes da replicação do eco num determinado alvo.

Cada impulso emitido pelo transdutor é composto por um conjunto de feixes de ondas acústicas em forma de leque, cuja soma dos pontos adjacentes muito próximos entre si (cerca de 1 grau, dependendo do sistema) forma uma linha de feixes transversais ao sentido de navegação do navio, linha esta que vai incidir e varrer o fundo do mar. A sequência da incidência de um conjunto de linhas no fundo do mar forma o rasto do sonar, cuja soma forma uma malha densa de pontos, permitindo obter uma cobertura praticamente integral do fundo do mar pelo varrimento do sonar. Para cada um destes feixes estreitos é calculado o tempo de viagem nos dois sentidos do pulso acústico usando um algoritmo de deteção do fundo. Após calculada a velocidade do som na água, tendo em conta as especificidades da coluna de água, é então determinada a profundidade e o posicionamento do sinal de retorno com base no ângulo recebido no sonar e do tempo de viagem bidirecional. (IH Portugal, 2010)

Na água, as ondas sonoras do sonar viajam mais longe do que as ondas de radar e de luz. Nas áreas de levantamento do sonar, a velocidade do som deve ser conhecida de forma a fornecer uma medição precisa dos pontos alvo. Os pulsos do sonar são transmitidos em múltiplos feixes estreitos, procurando assim minimizar a interferência da dispersão e obter dados de maior resolução, especialmente em águas mais profundas, onde a pegada do pulso varre uma área maior, pois o aumento da profundidade implica um aumento do tamanho da área de incidência do pulsar do sonar no fundo do mar. A área de cobertura do fundo do mar, extensão da incidência do pulso do sonar, varia em função da profundidade e da tipologia do fundo do mar. As sondas de feixe múltiplo podem ser utilizadas para obtenção de batimétricas em profundidades entre 0,50 m e 11.000 m.

O sonar pode operar em altas e baixas frequências de som. Frequências de som mais altas – até 1 Mhz – proporcionam uma melhor resolução da imagem, mas os pulsos só conseguem percorrer curtas distâncias. Frequências mais baixas – entre 24 kHz e 100 kHz – proporcionam uma resolução menor, mas os pulsos podem percorrer distâncias maiores. Normalmente frequências de 200 kHz são utilizadas para profundidades até 100 m. (Hoy e Kissinger, 2010)

As forças que incidem sobre o navio, quer em consequência da navegação, quer fruto da agitação marítima ou das condições atmosféricas, originam oscilações de estabilidade.

De forma a garantir a resolução dos dados obtidos estas variações devem ser determinadas instalando na embarcação de pesquisa sensores que permitam calcular a sua rotação vertical – Pitch, rotação lateral – Roll e rotação sobre o eixo – Yaw.

As sondas multifeixe medem com precisão o ângulo de transmissão e receção de cada feixe de acordo com o movimento do sonar em relação a um sistema de coordenadas de posicionamento horizontal. Os dados sonar obtidos em zonas de água turva, sujeitas a correntes ou marés, com sedimentos, vida marinha ou outras partículas em suspensão, são evidenciados nos levantamentos e tidos em consideração quando são processados.

Mas as sondas de feixe múltiplo não se limitam a obter dados batimétricos, permitindo igualmente determinar as características morfológicas e a composição da superfície do fundo do mar e obter a descrição detalhada, a imagem acústica da coluna de água (analisando as medidas de reflexividade obtidas em cada feixe) (Innangi et al., 2016).

As sondas MBES utilizadas para fins hidrográficos são caracterizadas por terem uma alta frequência de operação (> 300 kHz), grande número de feixes (> 500 u) com um pequeno ângulo de feixe ($0,5^\circ$), definindo frequências operacionais específicas de acordo com a profundidade e o tipo informação pretendida, produzindo dados batimétricos e de retrodispersão de alta resolução (Parnum e Gavrilov, 2011).

O MBES é atualmente o método mais eficiente e preciso de mapear grandes áreas do fundo do mar. A ampla faixa na coluna de água, a insonorização do fundo do mar e o movimento da navegação do navio possibilitam a geração de imagens em 3D.

Num levantamento batimétrico muitas hipóteses devem ser consideradas, tendo em conta a ambiguidade no tipo de alvo e as oscilações da dispersão. O uso de diferentes frequências depende do alcance e dos limites de deteção do sistema. Por exemplo, pequenos alvos em profundidades altas, como o zooplâncton e os peixes larvais, não serão detetáveis com um sonar de 12 kHz, pois são menores que o comprimento da onda acústica (cerca de 12,5 cm a 12 kHz). O recurso a frequências mais altas é necessário se o objetivo for examinar, nomeadamente, sedimentos em suspensão e outros pequenos alvos ou detetar fugas em *pipelines*. Quanto maior a frequência mais detalhes vão ser observados em pequenos alvos. No entanto, as áreas mais profundas não serão cobertas devido à forte atenuação do som com altas frequências. Consequentemente, análises a grandes volumes de água e de alcances grandes, como encontrar fontes termais ou identificar cardumes de peixes, operam com frequências mais baixas. Uma solução para evitar a limitação de alcance é instalar as sondas MBES em veículos subaquáticos. (Colbo et al., 2014).

Uma das maiores vantagens do MBES é que várias pesquisas científicas podem ser feitas simultaneamente. A quantidade e qualidade de dados obtidos num levantamento sonar com sonda multifeixe permite realizar estudos interdisciplinares, sendo de interesse para: estudar: a profundidade e constituição/formação da superfície do fundo do mar; conhecer os componentes sólidos da coluna de água; avaliar a relação predador e presa; detetar alvos de interesse junto à superfície do oceano (por exemplo, algas, destroços de naufrágios, peixes demersais); analisar os dados da coluna de água que oferecem um tremendo potencial para melhorar a nossa compreensão dos ecossistemas marinhos.

Nos últimos anos tem-se verificado uma melhoria contínua da tecnologia MBES, no planeamento, conceção e operação dos sistemas sonar, e juntamente com os avanços nos métodos de pós-processamento dos dados, é espectável que estas metodologias madurem e avancem drasticamente nas próximas décadas.

3.2 | LiDAR (Light Detection And Ranging)

A tecnologia LiDAR é uma técnica aérea de deteção ativa remota que usa um sensor remoto ótico para medir a distância a um objeto iluminando à superfície com luz laser. No sentido de obter dados batimétricos o LiDAR projeta dois feixes por pulso, um verde (532 nm de comprimento de onda) e um (próximo do) infravermelho (NIR – near infrared, 1.064 nm de comprimento de onda) em voo sobre a água.

O feixe verde penetra na superfície do mar e coleta informações na coluna de água e da superfície do fundo do mar. Por sua vez o feixe de laser infravermelho coleta informações sobre a superfície do mar. O LiDAR também pode coletar valores de intensidade que, como a retrodispersão acústica, fornecem informações sobre as características do fundo do mar (Costa et al., 2009; Kashani et al., 2015).

A profundidade é determinada pelo tempo de execução bidirecional entre as reflexões da superfície da água e do fundo do mar. Com o desenvolvimento desta técnica, a taxa de repetição do pulso e, conseqüentemente, a densidade do número de pontos obtidos tem sido significativamente aumentada com os sensores de última geração.

Os tamanhos de pegada, área no fundo do mar abrangida por cada pulso individual, e as larguras dos feixes, área no fundo do mar coberta por cada feixe laser ou de som, dos sensores LiDAR e MBES, mudam com a profundidade. Com o aumento da profundidade, os feixes de som das sondas MBES têm mais tempo para se espalhar na coluna de água ampliando a área insonorizada no fundo do mar. Para os sensores LiDAR, a pegada do laser e a largura dos feixes só mudam ligeiramente com o aumento da profundidade (a luz é refratada pela água e dispersa por partículas suspensas na coluna de água).

Portanto, a largura da faixa de um sistema LiDAR permanece bastante constante, não obstante as mudanças de profundidade (figura 19) (Parsons et al., 2015).

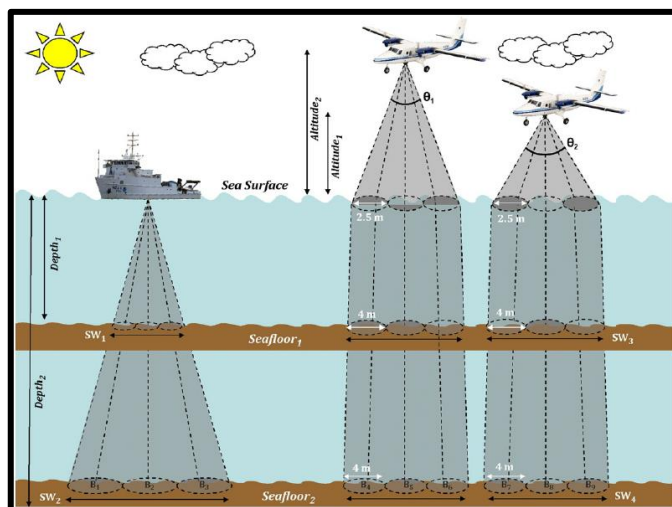


Figura 19 – Faixas de pegada e feixes de LiDAR e MBES de acordo com variações de a profundidade (Stephenson, 2007).

A tecnologia LiDAR é a única técnica que consegue obter dados batimétricos de alta resolução em profundidades muito baixas e em vastas áreas, o que a torna especialmente relevante para aplicações costeiras que requerem densidade de dados precisos (<1 m de resolução) (Brock e Purkis, 2009).

Contudo, os sistemas de batimetria LiDAR (ALB – Airborne Laser Bathymetry) têm algumas limitações que devem ser levadas em consideração, provocadas pela: turbidez da água, movimentos da ondulação na superfície do mar, profundidade (superiores a 50 a 70 m só conseguem ser obtidas em condições exceccionalmente boas), variações abruptas de profundidade, sedimentos rochosos (Costa et al. 2009, Chust et al., 2010; Jalali et al., 2015) e alterações na refletância em consequência de variações de temperatura, sedimentos em suspensão e fitoplâncton ou outras substâncias suspensas (Kashani et al., 2015).

Kogut et al (2016) concluíram que, em termos de resolução vertical de um ponto do fundo do mar, os dados obtidos por ALB (dados adquiridos pelo Sensor AHAB Chiroptera) cumprem as exigências internacionais em termos de precisão vertical, isto para o local escolhido para a aferição da profundidade que tinha aproximadamente 6 m (Ordem 1b IHO = TVU inferior a 1 m).

Os pulsos longos, as taxas de repetição relativamente baixas, pegadas largas e a penetração de água até 70 m tornam os sistemas atuais de LIDAR viáveis para produzirem modelos topográficos de águas costeiras, lagos e águas continentais rasas, que não obriguem ao nível de resolução máximo.

3.3 | Levantamentos Batimétricos Efetuados

No sentido de “fotografar” três janelas temporais dentro do período em que seria espectável ser verificado maior caudal e ocorrer maior agitação marítima procedemos a três levantamentos batimétricos com o objetivo de aferir variações, identificar tendências e caracterizar locais de acumulação de sedimentos.

Os levantamentos de profundidade foram efetuados no dia 9 de janeiro, 2 de abril e 5 de junho de 2017, com recurso a uma embarcação de recreio equipada com duas *plotters* da marca Lowrance®, modelo HDS-7, ou seja, dois sonares com dois transdutores de feixe simples (modelo transdutor BB = marca Lowrance® modelo, HST DFSBL, 50 kHz (29°) – 200kHz (12°), profundidade máxima 900m; modelo transdutor EB = marca Lowrance® modelo FA XDCR, 83 kHz (52°) – 200 kHz (22°), profundidade máxima 300m), capazes de transmitir até 20 pulsos (*pings*) por segundo (figura 20).



Figura 20 – Equipamento sonar instalado da embarcação e pesquisa: transdutor de BB, *plotters* da marca Lowrance modelo HDS 7 de feixe simples de BB e EB e transdutor de EB.

Para conferir maior rigor ao posicionamento horizontal de cada ponto GPS foi preterida a utilização da latitude de longitude associadas pelas *plotters* às leituras de profundidade obtidas pelos sonares, tendo sido instalado um sistema GPS Diferencial (DGPS - Differential Global Positioning System) cujas coordenadas foram utilizadas no âmbito do presente trabalho. Este sistema DGPS é uma evolução do GPS, conseguindo uma melhoria significativa na precisão da localização, que passou dos 15 m de um sistema GPS convencional para valores submétricos, que pode mesmo atingir os 10 cm. A génese do sistema DGPS consiste na aplicação de métodos de correção diferencial aos erros provocados pela atmosfera no sistema GPS, recorrendo ao cálculo de correções efetuadas por estações terrestres (estações base), que transmitem as diferenças entre as posições indicadas por satélites e essas posições fixas conhecidas. (Azuike et al., 2012; Brissette, 2012)

Foram analisados os movimentos de rotação da embarcação utilizada no levantamento batimétrico no sentido de permitir corrigir a posição da embarcação de acordo com a sua inclinação efetiva fruto da agitação do mar, do vento, das correntes, etc. Para tal utilizou-se um sensor inercial (IMU – Inertial Motion Units) que permite calcular correções a

efetuar ao posicionamento horizontal obtido pelo sistema de localização por satélite, conseguindo assim conferir maior exatidão à localização efetiva da embarcação de pesquisa. Ou seja, às coordenadas GPS são aplicadas correções de acordo com a inclinação da embarcação de pesquisa: rotação vertical – Pitch, rotação lateral – Roll e rotação sobre o eixo – Yaw. Considerando a dimensão do barco, a altura das águas vivas, o comportamento da embarcação a navegar, mas principalmente por os três levantamentos terem sido efetuadas com boas condições meteorológicas não foram objeto de análise as correções do sensor inercial (figura 21).

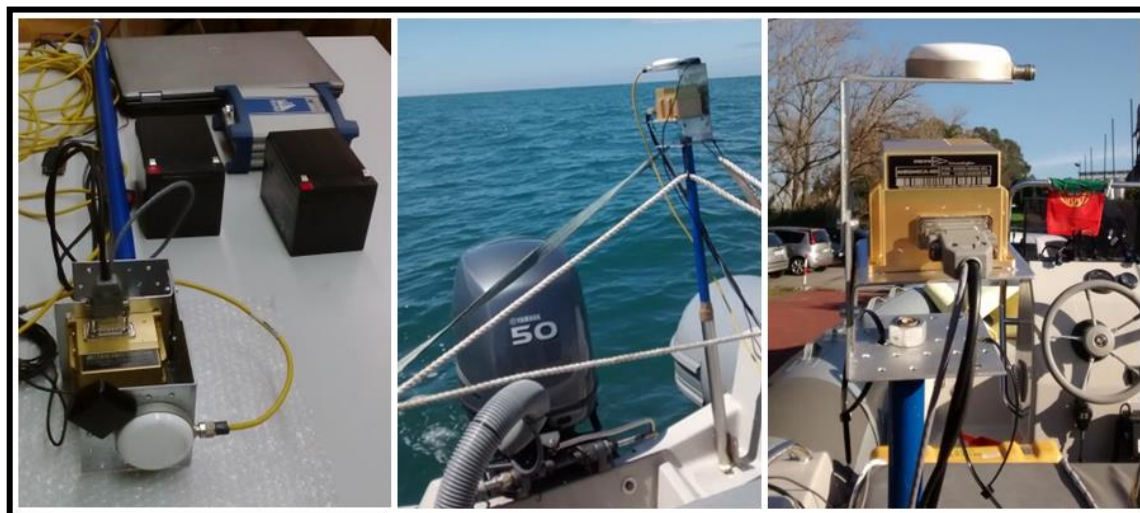


Figura 21 – Sistemas de GPS Diferencial instalados na embarcação de pesquisa.

Os percursos realizados (figuras 23 a 26) divergiram apenas ligeiramente do percurso planeado (figura 22), principalmente, nas zonas de pouca profundidade como na Baía de São Paio, na proximidade das margens e na zona de rebentação. Podem ainda existir desvios por se encontrarem embarcações fundeadas no percurso idealizado, por se encontrarem embarcações em faina, pescadores nas margens, mergulhadores na água ou pessoas a nadarem.

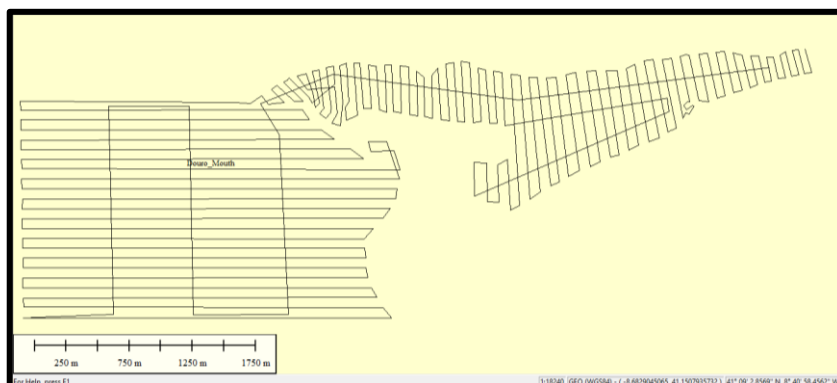


Figura 22 – Malha da máscara das linhas idealizadas como percurso dos levantamentos batimétricos.



Figura 23 – Percurso efetivamente realizado (rasto de navegação) no decurso do levantamento batimétrico do dia 9 de janeiro de 2017.

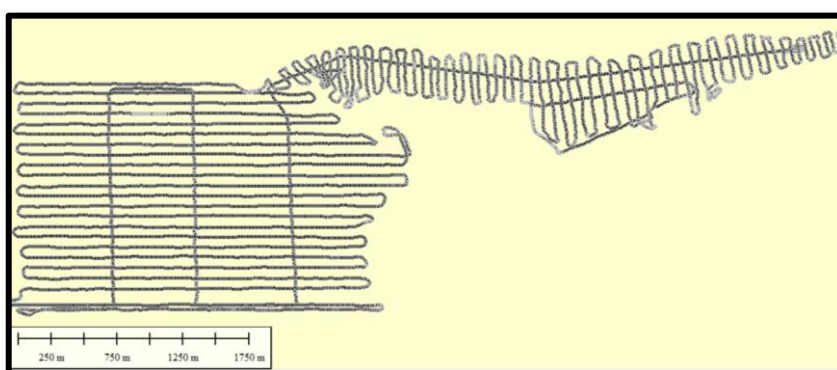


Figura 24 – Percurso efetivamente realizado (rasto de navegação) no decurso do levantamento batimétrico do dia 9 de janeiro de 2017.

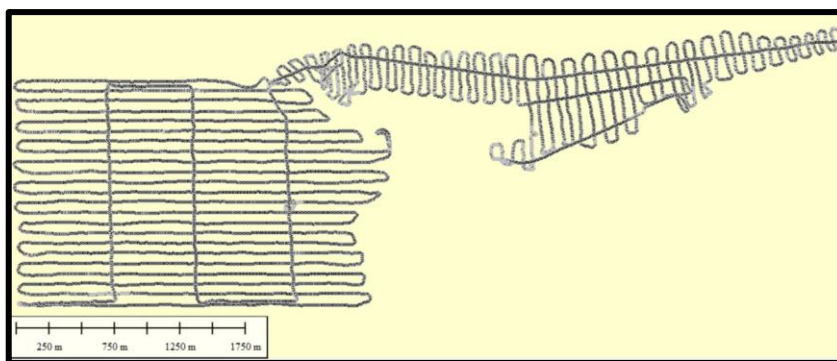


Figura 25 – Percurso efetivamente realizado (rasto de navegação) no decurso do levantamento batimétrico do dia 2 de abril de 2017.

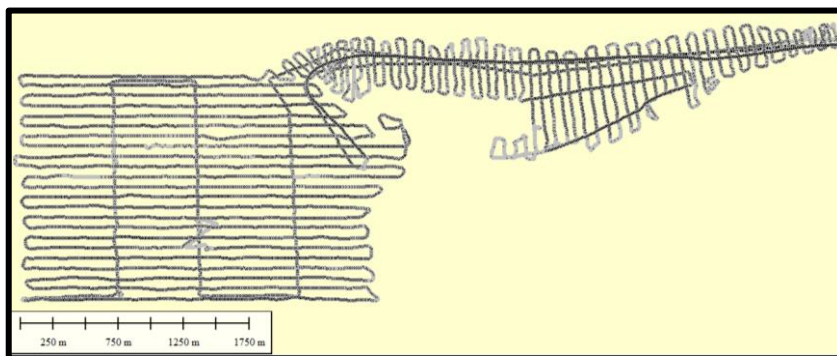


Figura 26 – Percurso efetivamente realizado (rasto de navegação) no decurso do levantamento batimétrico do dia 5 de junho de 2017.

Os dados batimétricos foram validados – remoção de profundidades falsas ou consideradas incongruentes, interrogados – extensão e coerência associada – agregando profundidades medidas a bombordo (BB) e estibordo (EB), afetando a cada profundidade uma coordenada, para a posterior análise no sistema de informação geográfica.

Tabela 2 – Súmula dos dados em bruto considerados válidos resultantes dos 3 levantamentos efetuados com os sonares.

Dat.Levant.	Sonar	N. Pontos	% Lev. vs Total	% Lev.	Profundidade (m)			Duração Minutos	
					Mín.	Max.	Méd.		
09-jan	BB	160.059	28,4%	56,3%	0,99	29,68	11,00	204,30	27,7%
09-jan	EB	124.438		43,7%	0,93	29,74	12,02		
		284.497			0,93 a 29,74				
02-abr	BB	167.696	29,4%	57,0%	0,80	30,68	10,06	227,89	30,9%
02-abr	EB	126.469		43,0%	0,80	29,01	11,30		
		294.165			0,80 a 30,68				
05-jun	BB	241.090	42,2%	57,1%	0,44	31,71	9,93	305,38	41,4%
05-jun	EB	181.172		42,9%	0,47	29,18	11,39		
		422.262			0,44 a 31,71			737,57	
		1.000.924							

Em suma, no decurso dos três levantamentos batimétricos foram obtidos e validados mais de 1 milhão de pontos com dados relativos à profundidade (tabelas 2 e A1). Os valores mínimos e máximos da profundidade oscilaram entre 0,44 m e os 31,71 m. Os dois levantamentos iniciais correspondem a 28% e a 29% do total dos pontos obtidos. No levantamento de 5 de junho verifica-se um aumento superior a 30% do número de pontos obtidos resultante do aumento do tempo gasto na execução do percurso.

3.4 | Outros Levantamentos Batimétricos

No sentido de estudar a evolução plurianual, foram objeto de análise dados batimétricos obtidos no passado pelo Instituto Hidrográfico em setembro 2015 e pelo autor, obtidos com o mesmo equipamento usado no presente trabalho em março de 2016. Ambos os levantamentos referidos têm uma área de pesquisa alvo menor à por nós definida para os três levantamentos realizados em 2017.

Como garantia da comparabilidade dos dados definimos uma máscara, que corresponde a uma área coincidente a todos os levantamentos, área comum essa que foi estabelecida e respeitada.

Levantamentos IH de setembro de 2015

No sentido de permitir aferir a evolução entre anos, procedemos ao tratamento e análise de dados processados e cedidos pelo Instituto Hidrográfico (IH Portugal, 2015) de um

levantamento executado em 2015, no âmbito do projeto *Douro Inland Waterway* (figuras 27, 28 e 29).

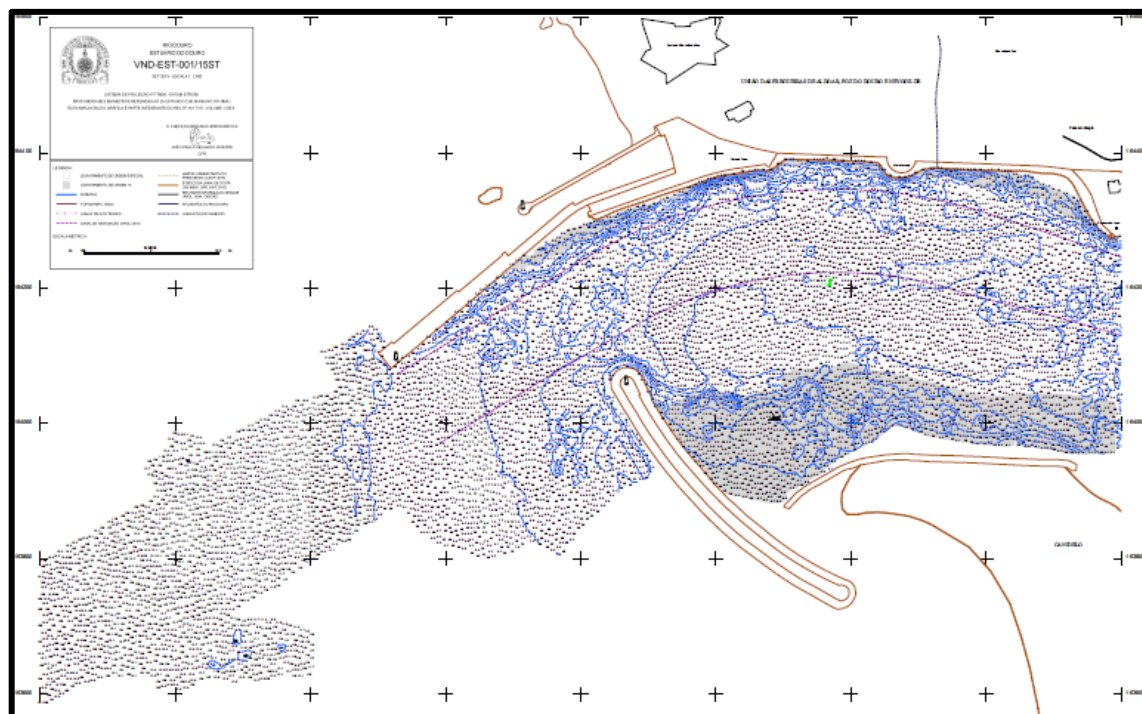


Figura 27 – Carta do estuário do Douro, Instituto Hidrográfico, VND-EST-001/15ST, setembro 2015 – Escala 1:2 000, sistema de projeção PT-TM06 / Datum ETRS89, unidades em metros referidas ao ZH (situado 2 m abaixo do NMA).

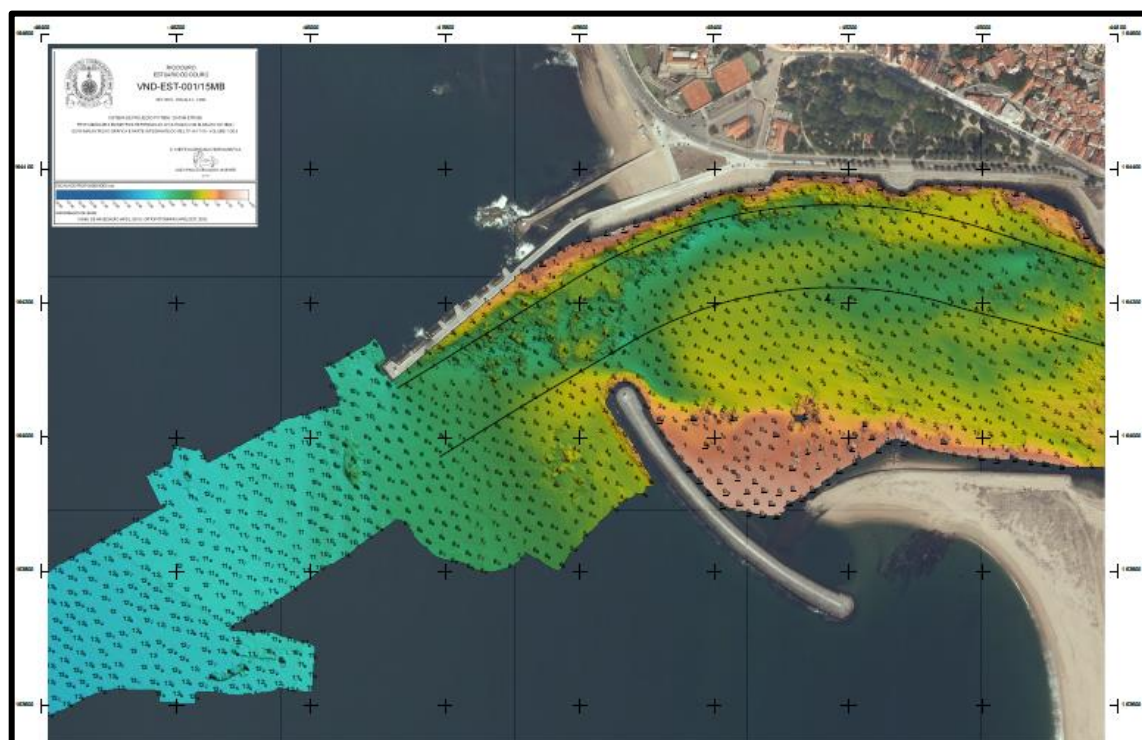


Figura 28 – Ortofotomapa do estuário do Douro, Instituto Hidrográfico, VND-EST-001/15MB, setembro 2015 – Escala 1:2 000, sistema de projeção PT-TM06 / Datum ETRS89, unidades em metros referidas ao ZH (situado 2 m abaixo do NMA).

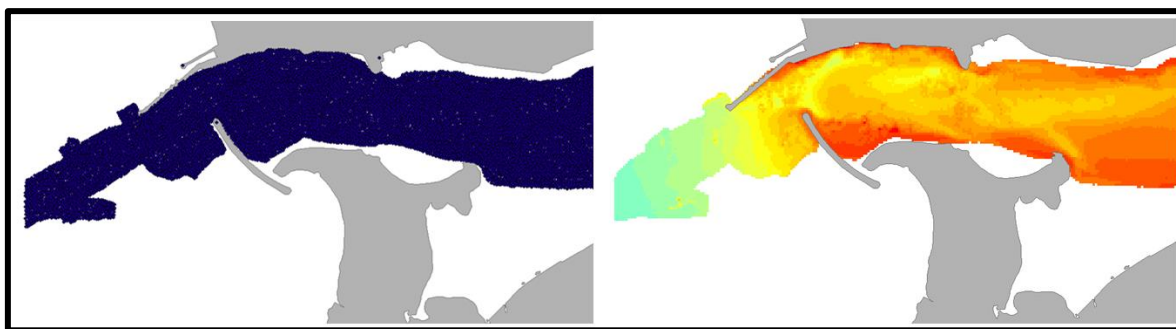


Figura 29 – Pontos do levantamento batimétrico do IH (esq.) e resultado da interpolação efetuada (dir.).

Levantamento Batimétrico de março 2016

Os dados de março de 2016 foram obtidos de forma idêntica aos do presente trabalho. Utilizou-se a mesma equipa, o mesmo equipamento e embarcação, com uma malha de navegação menos extensa, nomeadamente em termos da extensão na zona costeira, entre o molhe Norte da Barra do Douro e a praia de Lavadores (figura 30). Neste levantamento o posicionamento horizontal resultou das coordenadas GPS fornecidas pelo sensor que integra o equipamento sonar, ao contrário dos dados recolhidos no âmbito da tese em 2017, que foram obtidos por um recetor DGPS de alta resolução.

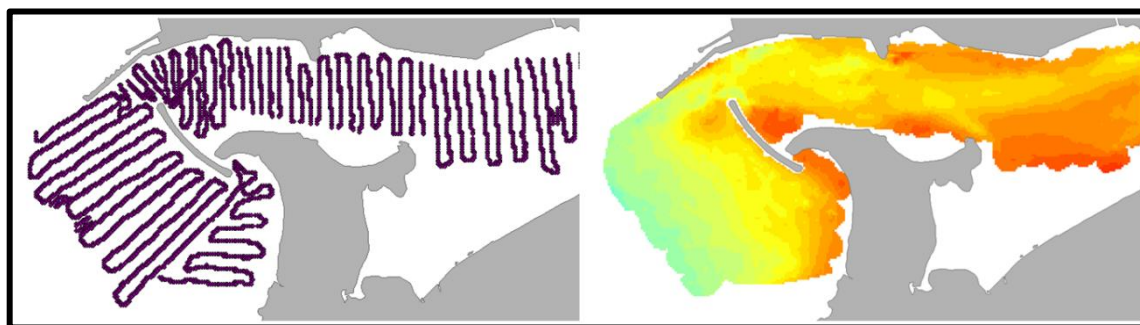


Figura 30 – Pontos do levantamento batimétrico de março de 2016 (esq.) e resultado da interpolação efetuada (dir.).

Os pontos de ambos os levantamentos, setembro de 2015 e março 2016 foram objeto da mesma análise e dos mesmos critérios de interpolação dos levantamentos efetuados em 2017.

3.5 | Resolução – Normas Internacionais IHO

Os padrões internacionais dos levantamentos batimétricos são estabelecidos desde 1968 pela Organização Hidrográfica Internacional (IHO – International Hydrographic Organization). A IHO é uma organização consultiva e técnica intergovernamental reconhecida pelas Nações Unidas como a autoridade internacional competente ao nível da hidrográfica, reunindo mais de 80 institutos hidrográficos nacionais. Os padrões e as especificações estabelecidos pela IHO devem ser seguidos para que uma pesquisa possa ser reconhecida em todo o mundo. O objetivo desta organização é assegurar a

produção de informações hidrográficas adequadas e atualizadas, garantindo que todas as águas navegáveis do mundo estejam adequadamente mapeadas, salvaguardando a segurança marítima, procurando garantir a proteção ambiental e uso sustentável do meio marinho (IH Portugal, 2010).

A IHO define padrões mínimos distintos para diferentes tipos de levantamentos hidrográficos, que devem ser estabelecidos previamente de acordo com o objetivo do levantamento (IHO, 2008). A exatidão dos valores alcançados é obtida pela comparação com valores assumidos como reais, isto porque o conhecimento do valor da profundidade verdadeira não é alcançado objetivamente. A incerteza resulta de uma avaliação estatística que define o intervalo, sobre um determinado valor, que conterá o valor verdadeiro da medição de acordo com um nível de confiança específico. O nível de confiança é a probabilidade de que o valor verdadeiro de uma medida esteja dentro da incerteza especificada a partir do valor medido. A incerteza resulta de limitações dos instrumentos de medição ou de distribuições estatísticas das profundidades medidas, interpolações (Sanders, 2011).

A IHO define normas mínimas para posicionamento: componente horizontal – incerteza da posição – incerteza horizontal (THU – Total Horizontal Uncertainty) e profundidade, componente vertical – incerteza de profundidade – incerteza vertical (TVU – Total Vertical Uncertainty), correspondendo a soma da THU com TVU à incerteza total (TPU – Total Propagated Uncertainty).

Encontram-se estabelecidas quatro ordens que definem os mínimos de qualidade para levantamentos hidrográficos, ordens definidas com base nos inerentes riscos para a navegação. A ordem especial a mais rigorosa para áreas com profundidade crítica de acordo com o calado dos navios, devendo ser detetadas pequenas especificidades do fundo marinho (THU 2 m e TVU $a = 0,25$ m e $b = 0,0075$, obriga a cobertura geral do fundo do mar), ordem 1a para áreas com menos de 100 m de profundidade, mas nas quais os perigos para a navegação são menos críticos mas podem ocorrer (THU 5 m + 5% da profundidade e TVU $a = 0,5$ m e $b = 0,013$, obriga à cobertura integral do fundo do mar), ordem 1b para áreas com menos de 100 m de profundidade, mas em que os perigos para os navios cuja navegação é expectável que se verifique no local não é tido como um problema (THU 5 m + 5% da profundidade e TVU $a = 0,5$ m e $b = 0,013$, já não obriga à cobertura integral do fundo do mar), e a ordem 2 para áreas em que a profundidade é superior a 100 m, sendo apenas suficiente uma descrição geral do fundo do mar, sendo a ordem menos rigorosa (THU 20 m + 10% da profundidade e TVU $a = 1,0$ m e $b = 0,023$, já não obriga à cobertura integral do fundo do mar).

A precisão e a segurança dos dados produzidos são cruciais para o desenvolvimento da hidrografia como ciência (Stone, 2016).

O TVU máximo permite mudanças de acordo com a profundidade e o tipo de pesquisa (por exemplo: para um levantamento de profundidade num local com profundidade de 5 m o TVU máximo da ordem especial é de 0,253 m sendo o TVU máximo da ordem 2 de 1,007 m; para uma profundidade de 50 m TVU máximo da ordem especial é de 0,451 m sendo o TVU máximo da ordem 2 de 1,524 m; para uma profundidade de 100 m o TVU máximo da ordem especial é de 0,791 m sendo o TVU máximo da ordem 2 de 2,508 m).

A incerteza de posição (THU) é estabelecida por comparação com o quadro do sistema geodésico de referência do Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS – International Terrestrial Reference System), e da norma de cartografia de origem geocêntrica WGS84 (World Geodetic System), sendo composta por um sistema de coordenadas para a Terra, uma superfície de referência esferoidal padrão (elipsoide de referência) para dados de altitude, e uma superfície gravitacional equipotencial (o geoide) que define o nível médio do mar.

3.5.1 | Resolução Vertical

Cada *plotter* utilizada no presente estudo está conectada a um transdutor que envia ondas de sonar para dentro da água no sentido de determinar a profundidade, o tempo de percurso dos ecos, sendo emitidos até 20 *pings* por segundo (a embarcação está equipada com 2 *plotters* e 2 transdutores).

Para além do menor custo do equipamento face a um sistema batimétrico profissional de feixe simples, este método permite obter mais volume de dados durante o levantamento, o que aumenta a precisão e a exatidão do modelo geoestatístico resultante, diminuindo o espaçamento entre pontos reais.

No sentido de aferir a resolução do equipamento utilizado comparámos leituras do sonar com medidas de profundidade exatas medidas com recurso a estacas fixas.

Da análise dos dados constata-se que as profundidades registadas no sonar apresentam sempre um desvio negativo, ou seja, as profundidades registadas são sempre inferiores às profundidades reais (tabela 3). Este sentido do erro representa uma salvaguarda para a segurança na navegação, visto que os dados obtidos não representam profundidades

superiores às reais, mas constitui um erro sistemático, um enviesamento, no nosso estudo.

Tabela 3 – Comparação entre a profundidade registada nos sonares e a profundidade medida nas estacas fixas. Comparação com os 4 *standards* do IHO.

	Estacas			Estacas		
	Afurada	Reserva	Cabedelo	Afurada	Reserva	Cabedelo
Dados Sonda	1.450	1.210	1.850	1.250	1.000	1.700
Offset Transdutor	0.280	0.280	0.280	0.280	0.280	0.280
Profundidade Sonar	1.730	1.490	2.130	1.530	1.280	1.980
Profund. Real Estacas	1.840	1.620	2.290	1.670	1.350	2.020
Diferença	0.110	0.130	0.160	0.140	0.070	0.040
Dif. %	6.0%	8.0%	7.0%	8.4%	5.2%	2.0%
Standards IHO						
Ordem especial	0.250	0.250	0.251	0.250	0.250	0.250
Ordem 1a	0.501	0.500	0.501	0.500	0.500	0.501
Ordem 1b	0.501	0.500	0.501	0.500	0.500	0.501
Ordem 2	1.001	1.001	1.001	1.001	1.000	1.001

As diferenças obtidas para profundidades reais entre 1,35 m e os 2,29 m oscilaram entre menos 4 e 16 cm, o que corresponde a uma perda de precisão da profundidade real entre os 2% e os 8%. Saliente-se que estes valores cumprem por larga margem os padrões de qualidade mais exigentes para levantamentos hidrográficos estabelecidos pelo IHO.

No sentido de avaliar os efeitos da velocidade de navegação durante a execução do levantamento hidrográfico nas leituras de profundidade obtidas, procedemos a duas leituras em pontos fixos reais, com recurso a estacas, e a sucessivas repetições de medições exatamente do mesmo local com a embarcação de pesquisa parada e a navegar a diferentes velocidades (tabela 4).

Tabela 4 – Variações das leituras de profundidade de acordo com diferentes velocidades (em nós) de navegação.

	Emb_Parada		Emb_5n		Emb_10n		Emb_15n	
	BB	EB	BB	EB	BB	EB	BB	EB
Dados Sonda	1.40	1.50	1.30	1.40	1.40	1.50	1.40	1.50
Offset Transdutor	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Profundidade Sonar	1.68	1.78	1.58	1.68	1.68	1.78	1.68	1.78
Profund. Real Estacas	1.72	1.86	1.72	1.86	1.72	1.86	1.72	1.86
Diferença	0.04	0.08	0.14	0.18	0.04	0.08	0.04	0.08
Dif. %	2.3%	4.3%	8.1%	9.7%	2.3%	4.3%	2.3%	4.3%

Dos registos obtidos conclui-se pela correspondência exata das medições de profundidade com a embarcação parada e a navegar a 10 nós e a 15 nós. Com a embarcação a navegar a 5 nós obtiveram-se registos de profundidade menores em 10 cm os quais se justificam com a maior inclinação do motor fruto do regime do motor e da inclinação vertical da embarcação a navegar a esta velocidade.

3.5.2 | Resolução Horizontal

Inicialmente, em 1994, o Sistema de Posicionamento Global, GPS, atingia precisões de posicionamento de 100 m, que foram melhorando até aos 15 m. Desde os anos 90 que o sistema de GPS diferencial (DGPS – Differential GPS) consegue melhorar a precisão da localização para valores submétricos, podendo atingir os 10 cm, corrigindo as posições indicadas pelos satélites com base nas diferenças calculadas em estações terrestres fixas, cujas posições fixas efetivas são conhecidas. Estações terrestres fixas que transmitem sinais digitais com o fim de obter a posição final calculada.

A IHO impõe a obrigação de nos levantamentos batimétricos ser cumprida uma incerteza horizontal máxima THU, na ordem especial, de no máximo de 2 m, com um nível de confiança de 95%. Recorrendo a sistema de posicionamento de GPS Diferencial esse valor pode ser facilmente verificado (Brissette, 2012; Howlett, 2013).

O recurso ao Sistema Diferencial de Navegação Global por Satélite (GNSS – Global Navigation Satellite System), tem a capacidade de oferecer posicionamento em qualquer ponto da superfície terrestre, recorrendo a dados de todos os sistemas de posicionamento por satélite disponíveis GPS, Glonass, Galileo e BeiDou permitindo alcançar a incerteza horizontal decimétrica, procedendo de forma contínua a correções emitidas pelas estações base, assim corrigindo os erros de posicionamento.

O Posicionamento Cinemático em Tempo-Real (Real Time Kinematic – RTK) é uma técnica de posicionamento que usa dados do GNSS procedendo a correções baseadas na medição da distância recetor-satélite através da fase da onda portadora dos sinais dos satélites (não fazendo uso das informações transmitidas por estes sinais) aplicando as correções enviadas por uma estação de referência, permitindo-se obter uma acurácia horizontal de cerca de 0,02 a 0,2 m. A técnica, no entanto, exige a necessidade de uma rede de telecomunicação entre o recetor GNSS e a estação de referência e que o recetor esteja a, no máximo, 20 km desta estação (NOAA, 2017).

A rede de estações base RTK que transmitem as correções, CORS (Continuously Operating Reference Station) permitem que a precisão das posições seja melhorada,

recorrendo a uma ligação à internet, podendo atingir precisão centimétrica (Stone, 2016). As correções diferenciais de RTK são feitas usando um telemóvel como *modem* e a rede de estações base. As estações de referência CORS aumentam a precisão, isto porque o recurso a mais do que uma estação ajuda a garantir o correto posicionamento e evita erros inerentes à utilização de uma única estação base.

Criando uma estação de referência virtual por cima da posição do navio de pesquisa, enviando a posição, latitude e longitude, para a rede das estações de referência, a técnica RTK pode atingir uma Incerteza Horizontal inferior a 1,5 cm.

As sondagens em águas rasas devem ser de alta resolução, garantindo um nível de precisão centimétrico, tanto relativamente à incerteza horizontal como vertical.

A evolução dos equipamentos multifeixe de alta resolução oferece aos hidrógrafos larguras de feixe de $1,0 \times 0,5^\circ$ (ou melhor) permitindo obter pequenas pegadas de insonorização e uma maior precisão da informação relativa ao fundo do mar.

Para garantir a legibilidade do resultado dos levantamentos de alta resolução, a incerteza do posicionamento horizontal deve ser menor ou igual ao tamanho da pegada do feixe MBES. Brissette (2012) disse que o sistema de posicionamento cuja precisão excede a largura do feixe do transdutor de sonar pode resultar em resultados de teste de calibração pobres e de sensibilidade de deteção fraca que podem resultar numa pesquisa de baixa qualidade.

Considerando a diferença do peso da incerteza horizontal face à vertical, pode-se concluir que os componentes horizontais do equipamento contribuem muito pouco para a incerteza total TPU, sendo portanto aconselhável, ao usar a última geração de sondas de multifeixe de alta resolução para os levantamentos batimétricos mais exigentes (ordem especial), obter uma resolução horizontal superior à obtida por um sistema DGPS. (Stone, 2016)

As *plotters* (utilizadas nos levantamentos de 2016 e 2017) estão equipadas com uma antena GPS interna de 5Hz, sensíveis a 16 canais, sendo possível melhorar a precisão dos sinais de navegação por satélite aplicando as correções do sistema Europeu complementar geoestacionário EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) fazendo com que a média do erro de posicionamento, face à posição real, seja inferior a 70 cm. Este processo de determinação da posição horizontal foi utilizado para o levantamento executado em março de 2016.

Relativamente aos levantamentos executados em 2017, com o objetivo de melhorar a resolução horizontal, utilizamos um sistema autónomo para obtenção de coordenadas de

com recurso a duas antenas DGPS, um recetor GNSS (Global Navigation Satellite System) da marca Novatel modelo DL-V3 de dupla frequência em modo relativo, utilizando uma estação de referência de coordenadas conhecidas, e um recetor GNSS da marca Trimble modelo NetR9 de multifrequências e multisistemas instalado no OAUP (Observatório Astronómico da Universidade do Porto), permitindo este modo de posicionamento em pós-processamento obter precisão melhor que 10 cm. Na antena DGPS foi ainda instalado um sensor de inércia, (IMU – Inertial Measurement Unit) da marca CrossBow no sentido de corrigir o posicionamento face ao comportamento da embarcação, permitindo corrigir a atitude da embarcação (rotação vertical – Pitch, rotação lateral – Roll e rotação sobre o eixo – Yaw).

O recurso a um sistema de posicionamento GPS de precisão permite garantir o posicionamento horizontal da embarcação face ao geoide da Terra. Subtraindo a este valor a altura da antena GPS em relação aos transdutores, considerando a proa a que a embarcação navegava, o ângulo da antena GPS, a posição dos transdutores na embarcação de pesquisa e a distância entre a posição dos transdutores e o plano de água, obtemos os vetores X e Y dos transdutores. O vetor z corresponde à profundidade obtida pelas sondas resultante do processamento da medição do tempo entre a emissão do feixe da onda acústica pelos transdutores e a receção dos correspondentes ecos de retorno, valores corrigidos pela distância entre a posição dos transdutores e o plano de água.

No decurso da configuração do equipamento, foi observada a interação entre os componentes, registadas respetivas distâncias, foram calibrados os equipamentos, efetuados os ajustes necessários e definidos os parâmetros corretos (figura 31).

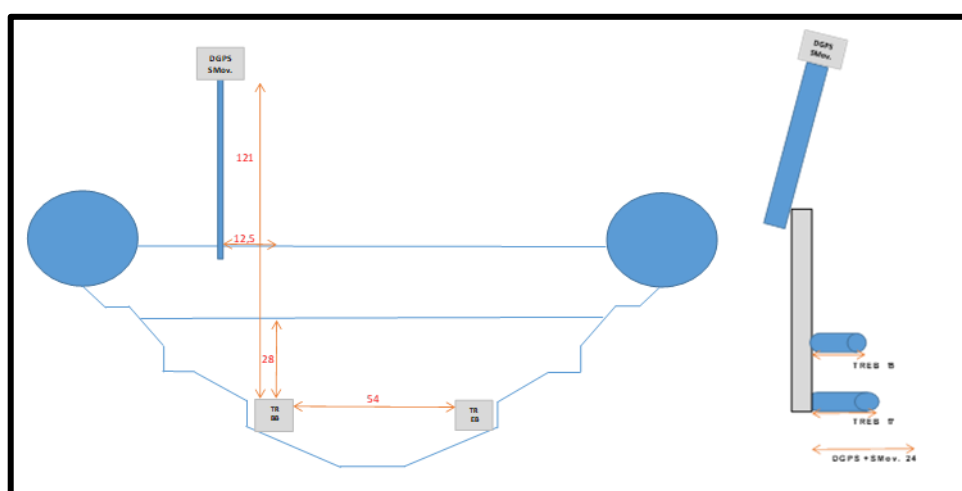


Figura 31 – Posicionamento e distâncias entre equipamentos de pesquisa batimétrica instalados na embarcação, painel de proa: (esquerda) antena com equipamento DGPS e dois transdutores, disposição lateral dos equipamentos no painel de popa (direita).

Em suma, os testes efetuados demonstram que os equipamentos utilizados são capazes de obter dados de profundidade e localização que asseguram o cumprimento os padrões mais exigentes da Organização Hidrográfica Internacional – IHO.

O cumprimento dos padrões mínimos de posicionamento (resolução horizontal) e profundidade (resolução vertical) exigidos pela IHO, foi aferido, não de acordo com as especificações do equipamento, mas com base nos resultados objetivos resultantes de testes efetuados no terreno com a embarcação de pesquisa devidamente equipada (com os sonares, transdutores e demais sensores instalados durante os levantamentos batimétricos) em pontos georreferenciados cuja profundidade real era conhecida.

3.6 | Análises SIG – Tratamento prévio dos dados

Dos levantamentos batimétricos realizados com as sondas de feixe simples, Lowrance HDS7 resultam ficheiros em formato .slg que contêm os dados registados pelo sonar no decurso do levantamento batimétrico. Estes ficheiros foram convertidos em ficheiros .csv com recurso ao *software* desenvolvido pela empresa detentora da marca do sonar a Lowrance, programa denominado Sonar Viewer (figura 32).

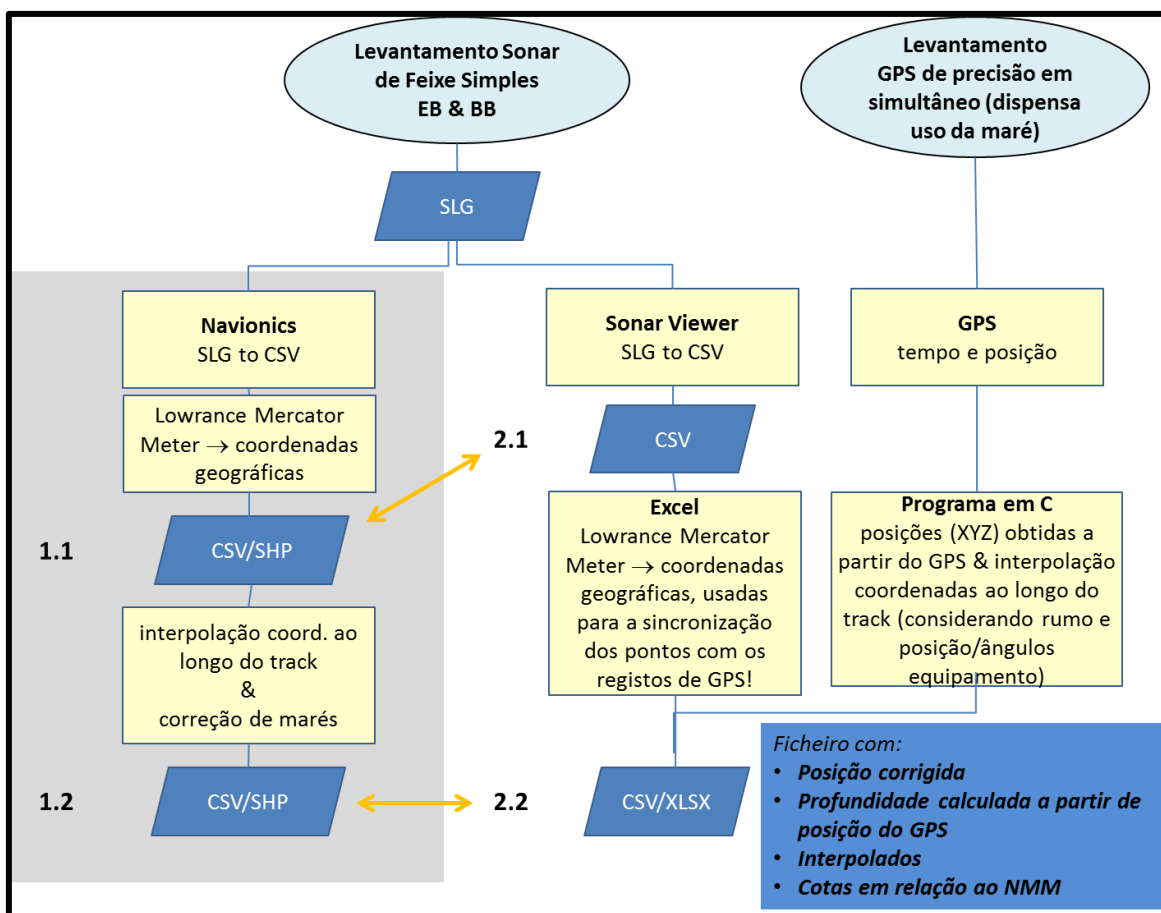


Figura 32 – Diagrama de fluxo dos procedimentos relativos à obtenção e tratamento de dados batimétricos, do sonar ao ArcGIS®.

Os ficheiros resultantes foram tratados, tendo sido removidas as profundidades classificadas pelo equipamento como falsas e expurgadas as sondagens com disparidades entre leituras de profundidades superiores a 15 cm. Posteriormente as profundidades foram convertidas de pés para metros e as coordenadas para o sistema de coordenadas ETRS89 Portugal TM06 (ETRS – European Terrestrial Reference System). Relativamente a cada levantamento foram agregados num só ficheiro os dados obtidos por ambas as sondas, bombordo e estibordo.

Da comparação dos dados e profundidade com os posicionamentos horizontais conclui-se que o número de registos de profundidade é muito superior ao número de coordenadas GPS registadas, ou seja, a cada coordenada correspondem vários pontos de profundidade. Procedeu-se a técnicas de interpolação no sentido de serem georreferenciados todos os pontos de profundidade.

Relativamente aos dados do Instituto Hidrográfico, por uma questão de homogeneidade com os restantes dados, as profundidades foram convertidas para valores negativos. Mais se refira ser comum as batimetrias do Instituto Hidrográfico afetarem às profundidades brutas uma “incerteza da sondagem” desconto que o IH atribui aos dados batimétricos no sentido de garantir uma salvaguarda adicional à navegação. Por este valor não ser conhecido, e por condicionar de forma direta a sonda reduzida, pode prejudicar a comparabilidade destes dados com os nossos.

Após o devido tratamento da informação foi criada uma base de dados, em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Os dados foram posteriormente inter-relacionados no sentido de detetar e quantificar as modificações verificadas ao longo dos anos.

No sentido de cobrir toda a área alvo do estudo procedeu-se à interpolação dos dados através da técnica de análise espacial denominada “Natural Neighbor”, sendo definido um tamanho da célula resultante de 10 m. O método de interpolação “Natural Neighbor” determina os pontos interpolados definindo o subconjunto mais próximo de pontos reais e atribui-lhe pesos distintos de acordo com a proporcionalidade das suas áreas (Sibson, 1981). Também é conhecido como Sibson ou “area-stealing”. Este método utiliza um subconjunto de pontos reais que circundam um ponto que se pretende estimar, define pesos de interpolação distintos, mas sempre dentro da gama das amostras utilizadas de forma a não inferir tendências e não produzir picos, poços, cumes ou vales que não estejam representados nos dados reais (El-Hattab, 2014).

Com o objetivo de eliminar pontos extremos ao longo dos trajetos da embarcação, resultantes de registos de profundidades não coincidentes entre as sondas de bombordo

e estibordo, convertemos todos os pontos insonorizados em *rasters*. A estes *rasters* com 10 m de área foi-lhes atribuído o valor da profundidade média de todos os pontos que caem dentro dessa célula. O *raster* foi reconvertido em pontos, pontos esses que foram então interpolados com recurso ao método Natural Neighbor. Ao mapa resultante da interpolação foi posteriormente aplicada uma máscara específica com a área de estudo para cada levantamento. Os limites da máscara foram definidos com recurso a um *buffer*, de modo a abranger toda a área até uma distância máxima de 50 m dos pontos (Merwade et al., 2008).

No sentido de permitir visualizar os principais impactos em termos morfológicos verificados entre levantamentos batimétricos, foram gerados modelos digitais resultantes das diferenças entre os fundos do plano de água (DMDT – Diferenças entre Modelos Digitais do Terreno). Para o enquadramento foi utilizada uma máscara da terra, da restinga e o desenho do molhe, com base no trabalho de Bastos et al. (2012), complementado com dados mais recentes fornecidos pelo CIIMAR.

Nos mapas digitais resultantes, as profundidades e as diferenças entre MDT foram classificadas de modo a obter uma melhor visualização dos dados, conferindo por exemplo um maior grau de detalhe às áreas menos profundas. Nas comparações entre observações apenas foram considerados com interesse as diferenças de batimetria superiores ou iguais a 50 cm (áreas com diferenças entre -50 cm e 50 cm estão representadas a cinzento nos mapas). Ou seja, as diferenças iguais ou inferiores a 50 cm, positivas ou negativas, foram consideradas irrelevantes, sendo variações potencialmente devidas a dinâmicas de muito curto prazo e a erros de medição, análise ou interpolação. Relativamente à comparação com os outros levantamentos, de setembro de 2015 do Instituto Hidrográfico e de março de 2016, levantamento próprio, fruto da maior incerteza dos dados, apenas foram consideradas relevantes diferenças inferiores a -1 m e superiores a 1 m.

Ressalte-se que a comparação apenas é efetuada para áreas coincidentes, ou seja, áreas em que existe cobertura de dados em ambos os levantamentos comparados. Assim se justifica a existência de áreas sem dados nos ficheiros comparados face aos modelos digitais isolados.

Em suma, recorrendo a ferramentas de ArcGIS® (versão 10.5.1) definiram-se os limites da área do estudo, procedeu-se à interpolação das batimetrias para as áreas não cobertas, de modo a permitir uma comparação entre períodos temporais, obtendo-se modelos digitais dos fundos do plano de água (MDT), para análise e cálculo das diferenças entre eles, identificando variações e tendências de evolução

CAPÍTULO 4 | RESULTADOS

Com o objetivo de conseguir explicitar e correlacionar dinâmicas que provocam as variações obtidas das comparações entre os modelos digitais resultantes dos levantamentos batimétricos, procedemos a uma análise aos principais fatores potenciadores de dinâmica de movimentação de sedimentos: a evolução dos caudais do Rio Douro e a identificação e caracterização da agitação marítima.

No sentido de permitir perceber e acompanhar de forma direta as variações de sedimentos, recolhemos leituras das respetivas alturas em pontos fixos por nós colocados na zona intertidal da Baía de São Paio, ao longo do tempo.

As batimetrias observadas no âmbito deste trabalho foram processadas e interpoladas, e analisadas em conjunto com batimetrias anteriores ao presente trabalho de forma a avaliar a morfodinâmica do leito estuarino e costeiro de curto e médio prazo.

4.1 | Evolução de Caudais do Rio Douro – 2000 a 2017

Com base na análise do caudal efluente médio diário (m^3/s) da barragem de Crestuma-Lever entre o ano 2000 e 2016, concluímos que a média anual do volume total do Rio Douro é de 16.059 hm^3 , a que corresponde um caudal médio por segundo de $532 \text{ m}^3/\text{s}$. Mais de 70,5% do volume de água é movimentado entre os meses de dezembro e abril, período em que a média mensal do caudal efluente total é de 2.290 hm^3 , chegando a média diária dos a atingir os $9.207 \text{ m}^3/\text{s}$ (tabelas 5 e A2).

Relativamente às variações do caudal entre períodos anuais, ocorreram caudais anormalmente elevados na época das chuvas (dezembro a abril/maio) nos anos de 2000/2001, com um caudal total registado superior a 40.464 hm^3 , de 2002/2003, 2009/2010, 2013/2014 e 2016, em que foram registados caudais superiores a 18 mil hm^3 . O mês com menor caudal ocorreu em agosto de 2002, com caudal total de 79 hm^3 (média do caudal mensal $30 \text{ m}^3/\text{s}$), sendo os anos com menor volume de água 2005 e 2012, com 5.160 hm^3 e 6.079 hm^3 , respetivamente. Efetuando uma comparação homóloga para os sete meses iniciais de cada ano verificamos que dos 18 anos em análise 2017 é o quarto ano com menor volume de água ($2005 - 3.326 \text{ hm}^3$, $2012 - 3.724 \text{ hm}^3$, $2002 - 4.975 \text{ hm}^3$ e $2017 - 5.256 \text{ hm}^3$), representando um desvio para menos de 55% face à média do caudal total, 11.608 hm^3 .

Tabela 5 – Caudal efluente médio (m³/s) e caudal total (hm³)
mensal da barragem de Crestuma-Lever, entre janeiro de 2000 e julho de 2017.
Fonte: <http://snirh.pt/> (setembro 2017).

Mês	2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009	
	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T
	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)
Janeiro	439	1 176	4 053	10 856	260	696	2 532	6 782	686	1 838	189	507	250	671	434	1 163	270	722	592	1 585
Fevereiro	321	804	3 254	7 871	359	868	1 293	3 128	771	1 931	224	541	271	655	948	2 294	203	509	1 022	2 473
Março	245	657	4 453	11 927	511	1 369	1 274	3 412	585	1 566	219	587	767	2 055	920	2 465	167	446	388	1 040
Abril	752	1 948	1 017	2 637	363	941	1 069	2 770	447	1 159	301	781	583	1 511	383	993	679	1 760	223	579
Maio	813	2 177	510	1 367	189	506	698	1 870	407	1 090	171	458	264	706	463	1 239	506	1 356	200	536
Junho	238	618	275	714	194	503	231	598	223	578	109	283	167	433	359	931	434	1 125	159	411
Julho	112	300	167	447	35	94	166	445	106	284	63	169	133	356	267	716	193	516	121	325
Agosto	126	338	183	491	30	79	78	209	136	364	46	124	74	197	208	557	74	198	100	268
Setembro	250	649	199	516	95	245	215	558	221	572	62	162	93	241	197	509	154	400	94	244
Outubro	246	659	322	861	200	535	380	1 018	381	1 021	37	99	518	1 388	276	739	135	362	148	395
Novembro	576	1 492	302	782	663	1 719	872	2 260	455	1 180	191	495	1 450	3 758	244	633	107	278	307	796
Dezembro	2 678	7 172	218	583	2 032	5 443	1 117	2 992	337	903	356	954	1 470	3 937	196	524	241	645	1 223	3 275
Ano	566	17 991	1 246	39 054	411	12 996	827	26 043	396	12 485	164	5 160	503	15 908	408	12 762	264	8 318	381	11 928
%		6,2%		13,5%		4,5%		9,0%		4,3%		1,8%		5,5%		4,4%		2,9%		4,1%
Média		1 499		3 254		1 083		2 170		1 040		430		1 326		1 064		693		994
7 meses	417	7 681	1 961	35 819	273	4 975	1 038	19 005	461	8 445	182	3 326	348	6 386	539	9 800	350	6 436	387	6 950
		3,7%		17,1%		2,4%		9,1%		4,0%		1,6%		3,1%		4,7%		3,1%		3,3%

Mês	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		Caudal Médio	% do	Caudal Total
	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	(m ³ /s)	Anual	Média (hm ³)
	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(hm ³)			
Janeiro	2 054	5 501	1 466	3 928	209	561	814	2 179	1 562	4 184	427	1 143	1 558	4 174	339	908	1 008	16,8%	2 699
Fevereiro	1 456	3 523	896	2 167	151	378	693	1 676	2 598	6 284	691	1 671	1 546	3 874	633	1 532	963	14,6%	2 343
Março	1 934	5 179	758	2 030	163	436	1 294	3 467	1 087	2 910	561	1 502	908	2 432	445	1 193	927	15,4%	2 482
Abril	1 091	2 827	636	1 649	180	466	1 465	3 797	1 121	2 905	357	925	1 930	5 003	216	559	712	11,5%	1 845
Maio	596	1 596	412	1 105	399	1 070	413	1 106	284	761	411	1 101	1 271	3 405	197	529	456	7,6%	1 221
Junho	405	1 051	182	472	203	527	237	615	229	594	210	545	389	1 008	137	356	243	3,9%	631
Julho	287	768	131	351	107	286	140	376	145	387	149	398	217	580	67	180	145	2,4%	388
Agosto	152	407	106	285	93	248	179	480	136	365	123	331	198	530			120	1,9%	322
Setembro	162	420	174	452	75	194	205	531	235	608	198	512	216	559			167	2,5%	434
Outubro	179	479	198	529	174	466	329	882	366	979	250	671	238	636			257	4,0%	689
Novembro	379	984	446	1 156	336	870	390	1 011	660	1 712	352	913	245	636			469	7,1%	1 216
Dezembro	952	2 550	373	999	450	1 207	524	1 404	544	1 457	204	546	294	787			777	12,2%	2 081
Ano	804	25 285	482	15 121	212	6 709	557	17 524	747	23 148	328	10 257	751	23 623	291	5 256	520		16 351
%		8,7%		5,2%		2,3%		6,1%		8,0%		3,5%		8,2%		1,8%			
Média		2 107		1 260		559		1 460		1 929		855		1 969		751			
7 meses	1 117	20 445	640	11 700	202	3 724	722	13 216	1 004	18 026	401	7 285	1 117	20 475	291	5 256	636		11 608
		9,8%		5,6%		1,8%		6,3%		8,6%		3,5%		9,8%		2,5%			

Mais se refira que existe uma homogeneidade de valores do caudal do Rio Douro observados antes e após a construção dos molhes, ou seja comparando o volume efluente em Crestuma Lever entre os anos de 2000 e 2007 e os anos de 2009 a 2016, concluímos que o volume dos respetivos caudais é similar. A variação mensal/ano do caudal total do Rio Douro está representada graficamente na figura 33.

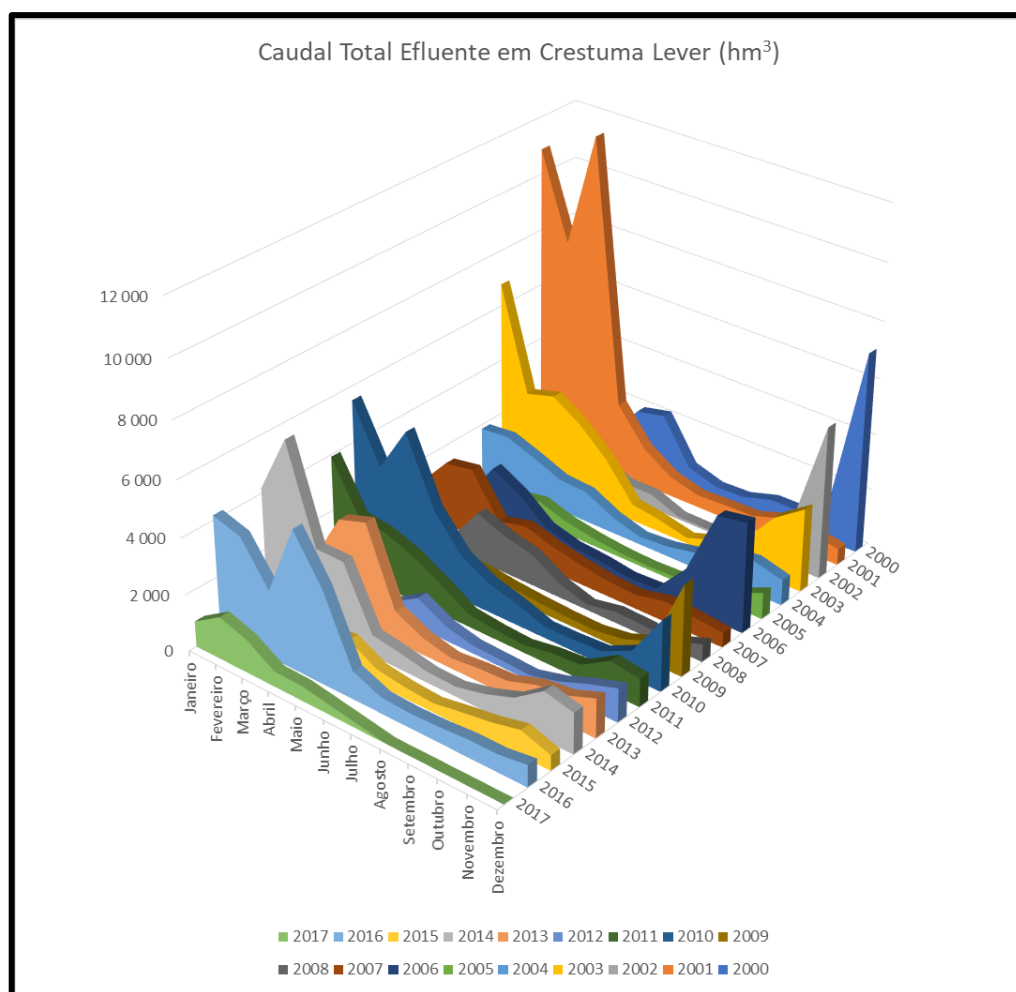


Figura 33 – Caudal efluente mensal na barragem de Crestuma Lever ($\text{hm}^3/\text{mês}$), entre janeiro de 2000 e julho de 2017 (fonte: <http://snirh.pt/> (setembro de 2017)).

4.2 | Análise da Agitação Marítima

Da análise à agitação marítima no período compreendido entre outubro de 2016 e junho de 2017, suportada nos dados registados pela boia ondógrafo de Leixões, do Instituto Hidrográfico, obtivemos a direção e quantificamos a intensidade e duração da agitação marítima. No sentido de relacionar esses dados com as datas dos levantamentos batimétricos executados segmentamos a análise para respetivos períodos prévios às datas de realização dos levantamentos batimétricos.

Em relação aos 3 períodos prévios aos levantamentos batimétricos efetuados (9 de janeiro, 2 de abril e 5 de junho de 2017) e com base nos parâmetros altura significativa e direção da ondulação, concluímos que a ondulação mais forte se verificou entre 9 de janeiro e 1 de abril de 2017, período considerado relevante para efeito de transporte de sedimentos, visto que se verificou ondulação em que a altura significativa das ondas foi superior a 4 m, a direção do pico foi Oeste-noroeste (292°), tendo a ondulação registado uma altura significativa inferior a 2 m em menos de 11% desses dias (figura 34).

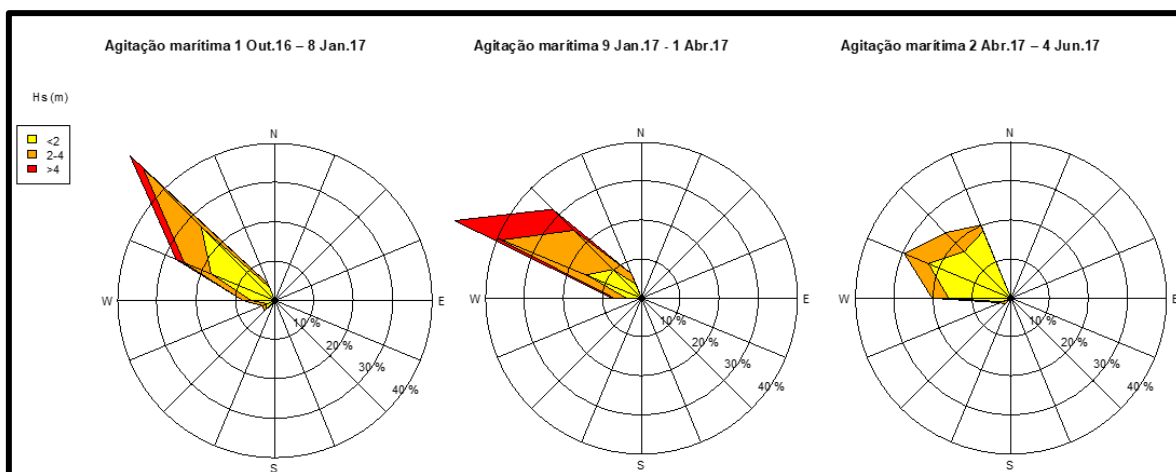


Figura 34 – Direção e intensidade da agitação marítima medida na boia ondógrafo de Leixões, do IH, com a distribuição das direções médias ($^{\circ}$) para diferentes classes de altura significativa (m).

Relativamente ao período de 1 de outubro de 2016 a 8 de janeiro de 2017, observa-se um pico em que verificou a ocorrência de ondulação com altura significativa superior a 4 m, neste caso com direção do pico de ondulação Noroeste (315°), tendo a ondulação registado uma altura significativa inferior a 2 m em menos de 20% desses dias. No período entre 2 de abril e 4 de junho a agitação marítima verificada, comparativamente com dois períodos anteriores, não será considerada significativa.

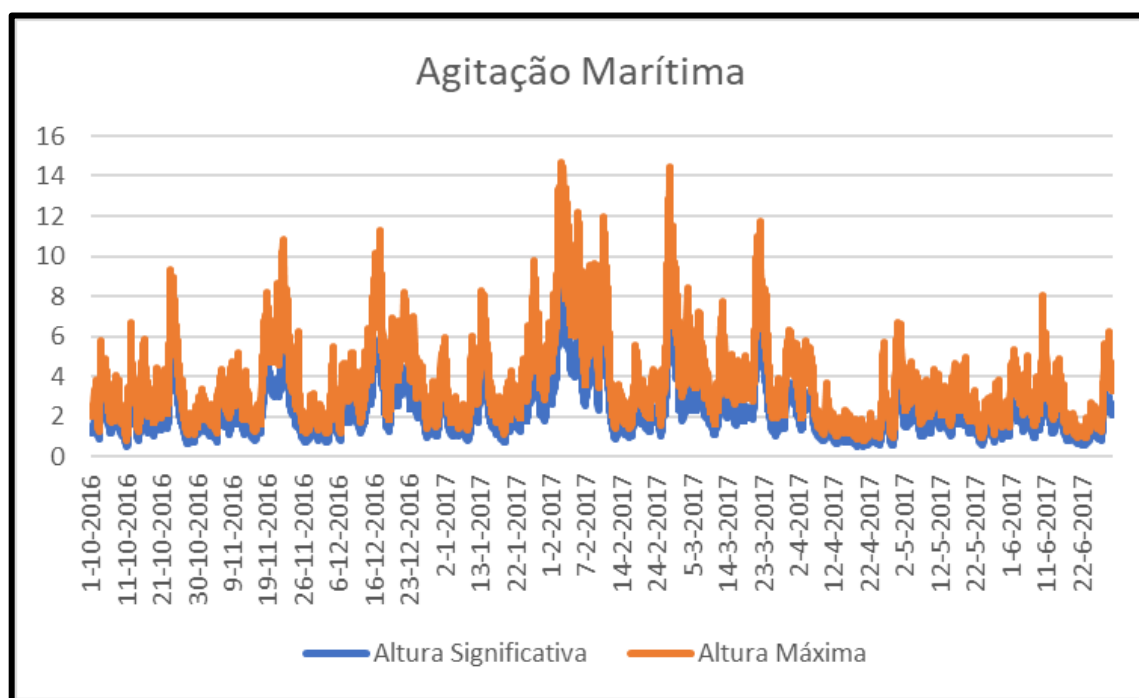


Figura 35 – Agitação marítima registada na boia ondógrafo de Leixões de outubro de 2016 a junho de 2017.

Da análise efetuada à tendência da distribuição da altura significativa e da altura máxima ao longo do período em análise concluímos que o período de maior agitação marítima se verificou em fevereiro de 2017, entre os dias 2 e 10 (9 dias), em que a altura significativa média foi de 4,83 m, a altura máxima registada foi de 14,65 m e a média da altura

máxima foi de 8,06 m. Considerando as datas de realização dos levantamentos batimétricos, destacam-se mais dois picos de ocorrência de agitação marítima entre 27 de fevereiro e 1 de março (3 dias, altura significativa média 4,67 m, altura máxima 14,46 m; média da altura máxima 7,07 m) e entre 22 e 23 de março (2 dias, altura significativa média 4,61 m, altura máxima 11,76 m; média da altura máxima 7,47 m) (figura 35).

Tabela 6 – Distribuição mensal da altura significativa média, da altura máxima e do período médio (outubro de 2016 a junho de 2017).

Meses	Altura Significativa (média)	Altura Máxima	Período Médio
Outubro_2016	1,82	9,36	10,43
Novembro_2016	2,07	10,80	9,58
Dezembro_2016	2,42	11,28	11,41
Janeiro_2017	2,09	9,76	10,49
Fevereiro_2017	3,42	14,65	11,20
Março_2017	2,71	11,76	10,65
Abril_2017	1,33	6,69	8,86
Mai_2017	1,63	6,62	8,72
Junho_2017	1,64	8,06	8,58
Média Período	2,13	9,89	9,99

Da comparação entre meses verifica-se uma clara diminuição da altura significativa média após abril, tendo sido apurado que a altura significativa média de abril a junho de 2017 foi de 1,53 m, não sendo, portanto espectável, que neste último período, que influencia o levantamento batimétrico de 5 de junho de 2017, a agitação marítima tenha tido uma ação considerada relevante para efeito de movimentação de sedimentos (tabela 6).

4.3 | Variações de Sedimentos na Baía de São Paio

As estacas cumpriram a sua função durante todo o período do trabalho de campo tendo as variações da altura dos sedimentos face à escala métrica das estacas permitido concluir por uma diminuição dos sedimentos no ponto exterior próximo ao limite da reserva denominado como “Afurada”, pela variação no mesmo sentido no ponto interior da área da reserva denominado como “Reserva”, de 1,30 cm e 2,10 cm respetivamente. Refira-se que esta tendência foi contínua ao longo do período em análise tendo todos os registos após janeiro correspondido a diminuições face ao volume inicial. Relativamente ao ponto exterior próximo ao limite da reserva denominado como “Cabedelo”, observou-se uma maior volatilidade de variações, tendo de janeiro a julho ocorrido uma variação positiva de 1,40 cm. Agregando os três pontos conclui-se por um decréscimo do nível do estrato de sedimentos em 2,00 cm (tabela 7).

Tabela 7 – Variações da altura (m) dos sedimentos de três estacas métricas colocadas na zona intertidal da reserva da Baía de São Paio

Data	Hora	Afurada			Reserva			Cabedelo			Σ Pontos	
		Medição	ΔInic.	ΔCont.	Medição	ΔInic.	ΔCont.	Medição	ΔInic.	ΔCont.	ΔGlobal	ΔMédia
15/01/17	10:50	11.50			10.00			5.20				
19/01/17	13:50	13.40	1.90	1.90	10.50	0.50	0.50				2.40	1.20
22/01/17	17:20	8.30	-3.20	-5.10	11.00	1.00	0.50				5.60	2.80
29/01/17	09:50	8.70	-2.80	0.40	10.40	0.40	-0.60	6.50	1.30	1.30	2.30	0.77
05/02/17	16:00	5.00	-6.50	-3.70	5.20	-4.80	-5.20				8.90	4.45
12/02/17	10:00	5.80	-5.70	0.80	8.00	-2.00	2.80	2.40	-2.80	-4.10	7.70	2.57
26/02/17	08:40	6.10	-5.40	0.30	8.10	-1.90	0.10	5.20	0.00	2.80	3.20	1.07
12/03/17	08:45	6.90	-4.60	0.80	8.30	-1.70	0.20	2.20	-3.00	-3.00	4.00	1.33
22/03/17	19:30	10.40	-1.10	3.50	8.80	-1.20	0.50				4.00	2.00
26/03/17	08:05	3.10	-8.40	-7.30	6.20	-3.80	-2.60	7.30	2.10	5.10	15.00	5.00
02/04/17	13:55	4.80	-6.70	1.70	7.40	-2.60	1.20	4.20	-1.00	-3.10	6.00	2.00
08/04/17	08:20	6.70	-4.80	1.90	9.10	-0.90	1.70	1.80	-3.40	-2.40	6.00	2.00
16/04/17	13:05	8.60	-2.90	1.90	8.80	-1.20	-0.30	3.30	-1.90	1.50	3.70	1.23
30/04/17	13:00	10.10	-1.40	1.50	8.70	-1.30	-0.10	5.10	-0.10	1.80	3.40	1.13
14/05/17	11:55	7.00	-4.50	-3.10	4.40	-5.60	-4.30	9.30	4.10	4.20	11.60	3.87
23/05/17	20:40	10.40	-1.10	3.40	8.80	-1.20	4.40	4.40	-0.80	-4.90	12.70	4.23
30/05/17	13:35	9.30	-2.20	-1.10	8.50	-1.50	-0.30	3.70	-1.50	-0.70	2.10	0.70
05/06/17	19:30	7.90	-3.60	-1.40	8.30	-1.70	-0.20	2.80	-2.40	-0.90	2.50	0.83
15/06/17	13:30	7.40	-4.10	-0.50	8.10	-1.90	-0.20	4.60	-0.60	1.80	2.50	0.83
25/06/17	10:50	7.10	-4.40	-0.30	7.80	-2.20	-0.30	6.70	1.50	2.10	2.70	0.90
08/07/17	21:10	6.70	-4.80	-0.40	7.60	-2.40	-0.20	6.40	1.20	-0.30	0.90	0.30
24/07/17	10:05	7.70	-3.80	1.00	7.40	-2.60	-0.20	7.00	1.80	0.60	1.80	0.60
31/07/17	16:20	10.20	-1.30	2.50	7.90	-2.10	0.50	6.60	1.40	-0.40	3.40	1.13

Em 4 das 22 leituras efetuadas não foi possível obter dados da altura dos sedimentos da estaca denominada “Afurada” por fraca amplitude da maré, mantendo-se a estaca “Cabedelo” coberta por água.

Da análise aos dados obtidos conclui-se que em de 56% dos registos em que foi possível recolher leituras das 3 estacas, ou seja 10 dos 18 registos, ocorreram variações de sentido oposto variando as estacas “Afurada” e “Reserva” em sentido oposto à estaca “Cabedelo”. Ou seja, quando se verifica acumulação na zona em que se encontram as estacas da “Afurada” e da “Reserva” ocorre perda de volume na estaca do “Cabedelo” (6 recolhas), e vice-versa (4 recolhas). Mais se conclui que essas oscilações em sentido oposto são coincidentes com as maiores variações globais de sedimentos.

Releve-se ainda terem sido verificadas variações desviantes da média: entre 5 e 12 de fevereiro, com uma variação absoluta de 16,6 cm, entre 22 e 26 de março com uma variação absoluta de 19,0 cm e entre 14 e 23 de maio com uma variação absoluta de 24,30 cm.

Comparando com os registos dos caudais do Rio Douro, concluímos existir correlação direta relativamente ao período de 4 a 11 de fevereiro, dias em que a média do caudal efluente no Douro foi de 905,20 m³/s (valor claramente superior à média do caudal de janeiro a julho de 2017, 286,94 m³/s). O período em questão também foi influenciado pela agitação marítima, tendo ocorrido de 2 a 5 de fevereiro ondulação com altura significativa média de 5,47 m (média da altura significativa de outubro de 2016 a junho de 2017 = 2,13 m). A ondulação atingiu uma altura máxima superior a 8 m durante 72h, ou seja, em 75% dos 4 dias (tendo atingido os 14,65 m de altura máxima de onda).

Relativamente ao período de 14 a 30 de março, a média do caudal efluente no Douro foi de 451,63 m³/s (valor claramente superior à média do caudal de janeiro a julho, de 2017, 286,94 m³/s). Considerando os registos da agitação marítima, verificamos que a altura significativa média registada de 22 a 24 de março foi de 4,27 m (média da altura significativa de outubro de 2016 a junho de 2017 = 2,13 m), tendo nesse período ocorrido ondulação com altura máxima superior a 5 m durante em mais de 50 h (tendo atingido os 11,76 m de altura máxima de onda).

Relativamente ao período de 14 a 23 de maio, não conseguimos deduzir qualquer correlação nem com o caudal do Rio Douro nem com a agitação marítima. Tentámos valorar outras variáveis como as marés extremas ou fenómenos anormais, por exemplo relacionados com o vento, não tendo, no entanto, as análises efetuadas sido conclusivas.

4.4 | Batimetrias Interpoladas

Os dados em bruto dos levantamentos de janeiro, abril e junho de 2017, obtidos em 737 minutos de pesquisa batimétrica, foram filtrados, com remoção dos valores que os sonares definiam como falsos, dos *outliers* resultantes de variações bruscas da altura dos transdutores provocadas por manobras da embarcação ou pelas condições do estado do mar em prol da homogeneidade e integridade dos dados obtidos. Da análise SIG dos 1.000.924 valores válidos resultantes (tabela 2) resultaram modelos digitais dos fundos da área em estudo, estuário do Rio Douro e zona costeira envolvente, tendo sido obtidas as batimetrias que constam nas figuras 36 a 38, referentes aos três levantamentos efetuados. Selecionou-se uma escala de graduação para as batimétricas entre 0 m, que corresponde ao nível médio do mar, o Zero Hidrográfico, e os 28 m de profundidade, com variações de 1 m até aos 26 m profundidade, comum a todos os períodos em análise (vermelho: zonas com menor profundidade; a azul: zonas de maior profundidade).

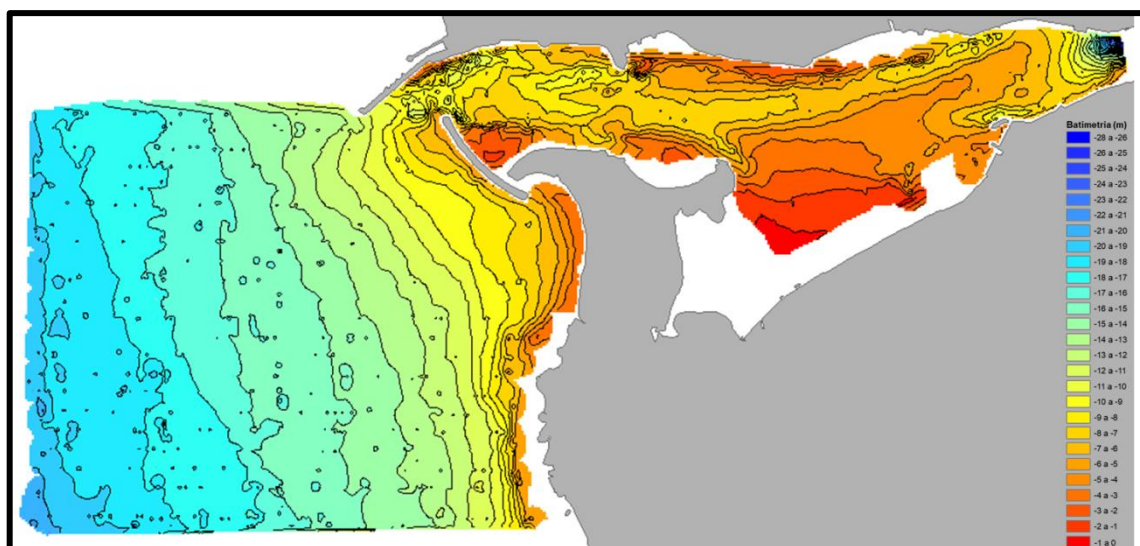


Figura 36 – Batimetrias interpoladas do levantamento de 9 janeiro de 2017, ArcGIS®.

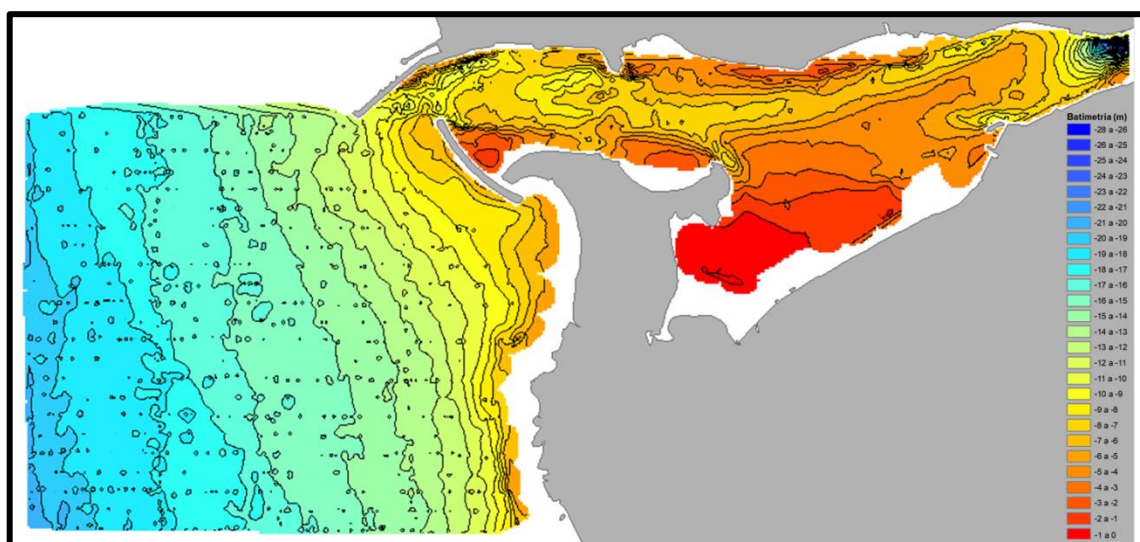


Figura 37 – Batimetrias interpoladas do levantamento de 4 de abril de 2017, ArcGIS®.

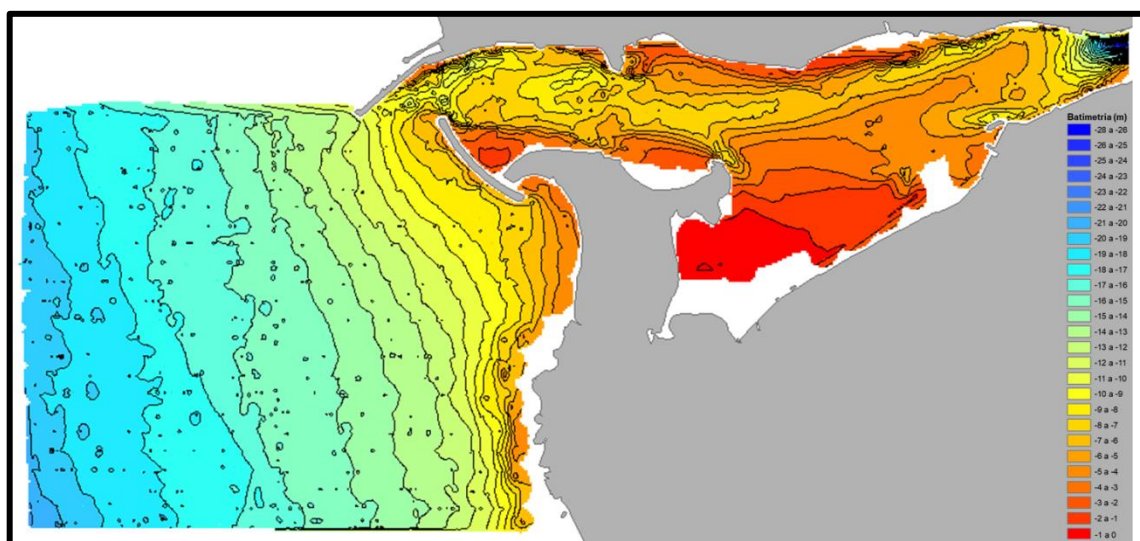


Figura 38 – Batimetrias interpoladas do levantamento de 5 de junho de 2017, ArcGIS®.

No período em análise, janeiro a junho de 2017, não ocorreu qualquer ação antropogénica, quer intervenções nos molhes quer dragagens, que tenha tido repercussões diretas na área. As variações observadas devem-se, portanto, provavelmente à ação dos fatores naturais (caudais, ondulação, marés, vento, etc.).

No sentido de destacar os locais em que se verificam modificações com particular interesse para o presente estudo efetuou-se uma comparação visual de diversas zonas. Na área da embocadura do Rio Douro na zona específica do enfiamento Norte do molhe Sul onde é perceptível estarmos perante uma zona de variação de cotas de profundidade, observa-se que o canal de navegação apresenta um crescente assoreamento entre janeiro e junho de 2017 (figura 39).

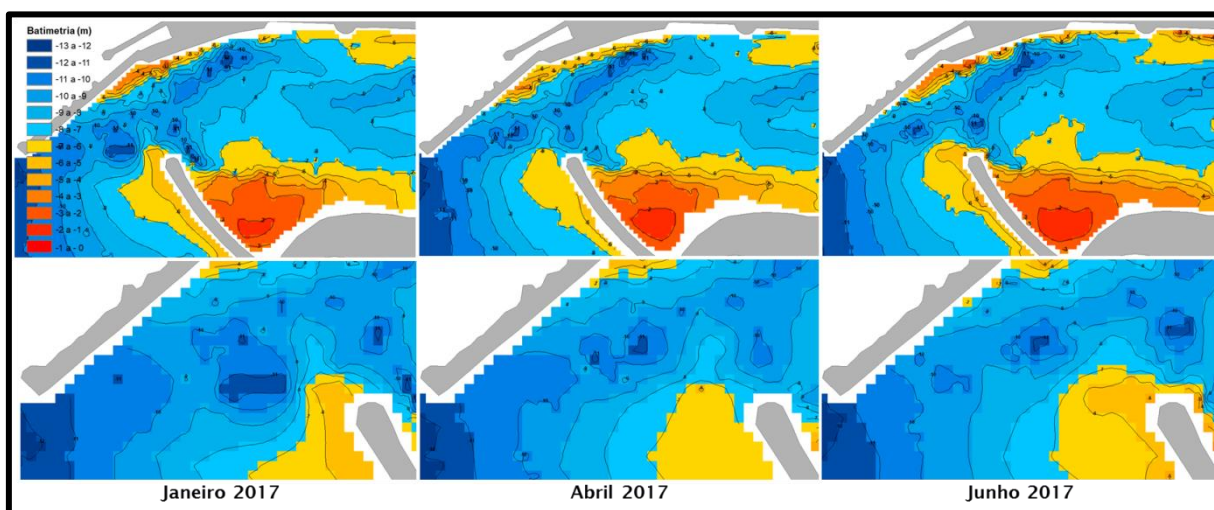


Figura 39 – Imagens que suportam as variações visuais das batimétricas na embocadura do Rio Douro, entre janeiro e junho de 2017, ArcGIS®.

A montante na margem direita, são notórios os efeitos do assoreamento da Ribeira da Granja no período entre janeiro e junho de 2017, existindo efetivo movimento de deslocação dos sedimentos em direção ao canal de navegação do Rio Douro, verificando-se uma diminuição clara de profundidade, com influência direta no canal de navegação (figura 40).

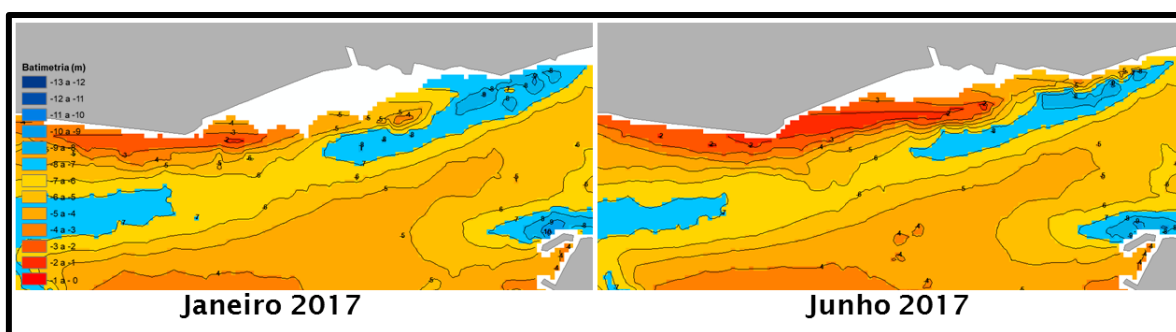


Figura 40 – MDT's das batimétricas interpoladas da margem direita do Rio Douro na envolvente da Ribeira da Granja em janeiro e junho de 2017, ArcGIS®.

Na zona interior do rio, na zona envolvente à Baía de São Paio, observa-se uma tendência de evolução da distância entre as isóbatas, sendo notória uma deslocação dos sedimentos em direção ao canal de navegação, verificando-se uma efetiva diminuição de profundidade (figura 41).

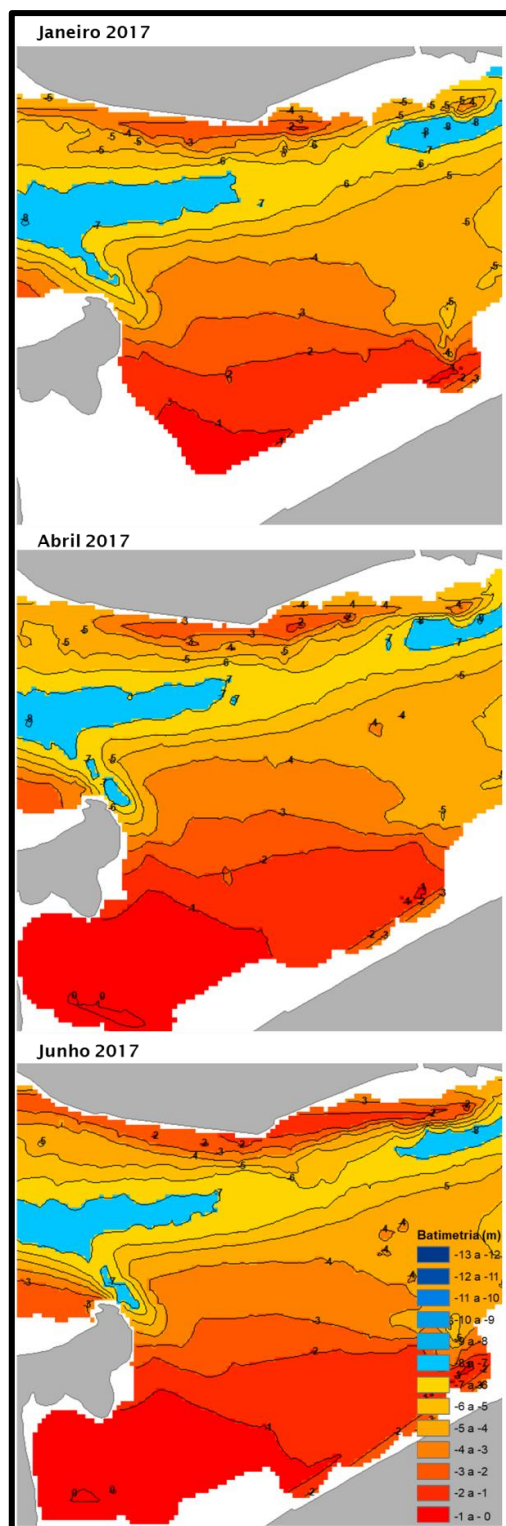


Figura 41 – MDT's das batimétricas interpoladas da margem esquerda do Rio Douro na envolvente da Baía de São Paio, em janeiro, abril e junho de 2017, ArcGIS®.

Saliente-se que estas duas zonas de assoreamento estão situadas em margens opostas, exercendo simultaneamente pressão sobre o canal de navegação.

Relativamente à zona costeira envolvente à embocadura do Rio Douro, entre os três levantamentos temporais, é notória uma tendência de desassoreamento. Da análise à evolução entre as isóbatas dos 20 m e dos 12 m observamos um aumento de profundidade (figura 42).

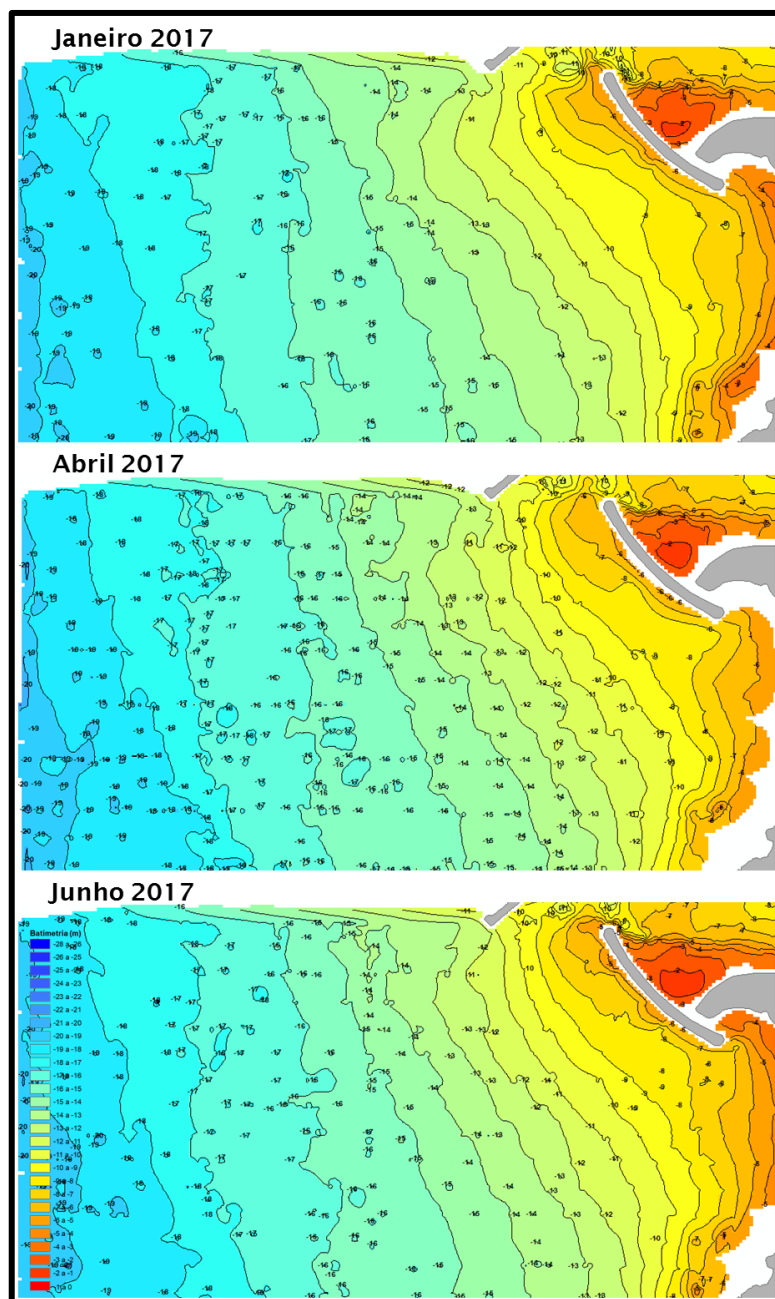


Figura 42 – MDT's das batimétricas interpoladas na zona exterior da embocadura do Rio Douro, em janeiro, abril e junho de 2017, ArcGIS®.

Já na zona costeira de menor profundidade, até à isóbata dos 9 m, na área a Sul do quebra-mar destacado e a Oeste da restinga, verificou-se uma tendência clara de assoreamento; resultado coincidente com o avanço da linha de costa, acreção, que tem ocorrido nesta área desde 2008.

4.5 | Batimetria – Dinâmica de Curto Prazo

Foram obtidos modelos digitais resultantes das diferenças entre os levantamentos efetuados no sentido de permitir detetar e quantificar alterações de profundidade e respetiva evolução temporal, de forma a serem percecionados as principais alterações morfológicas e a dinâmica estuarina (figura 43 – janeiro vs abril, figura 44 – abril – junho e figura 45 – janeiro vs junho).

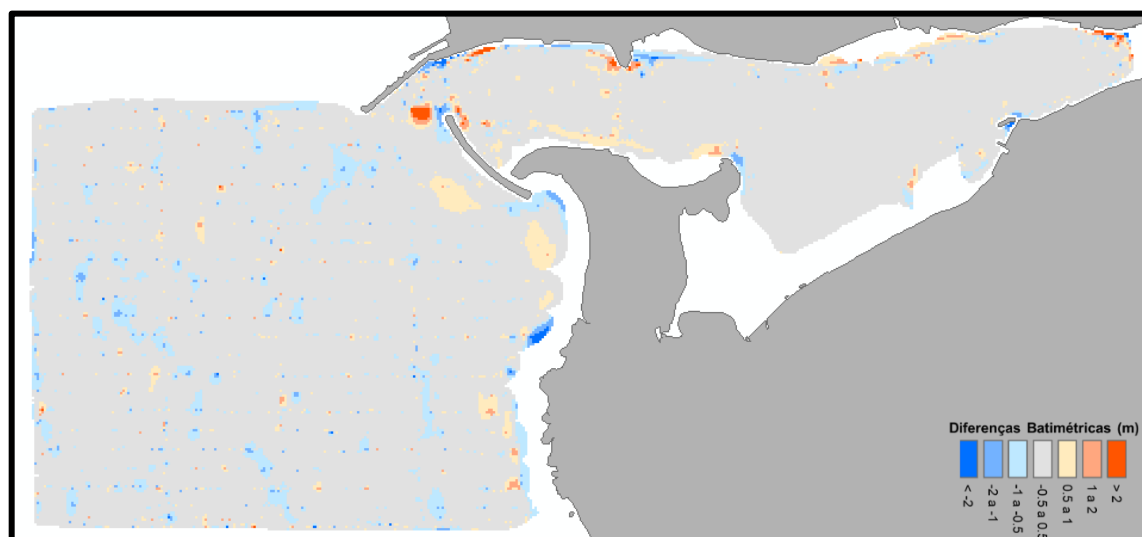


Figura 43 – Diferenças de Batimetria entre janeiro e abril de 2017, ArcGIS®.

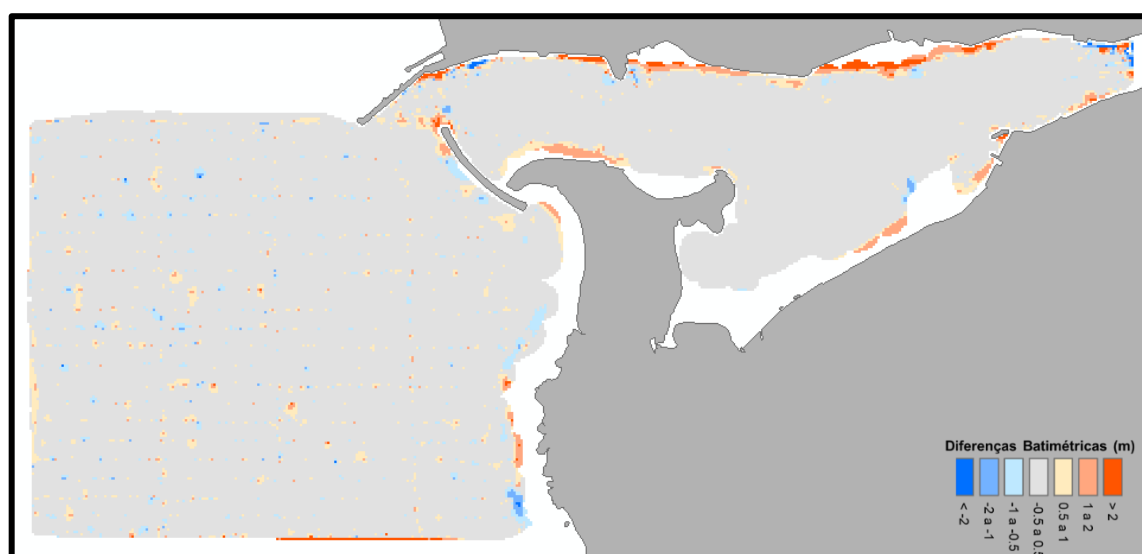


Figura 44 – Diferenças de Batimetria entre abril e junho, ArcGIS®.

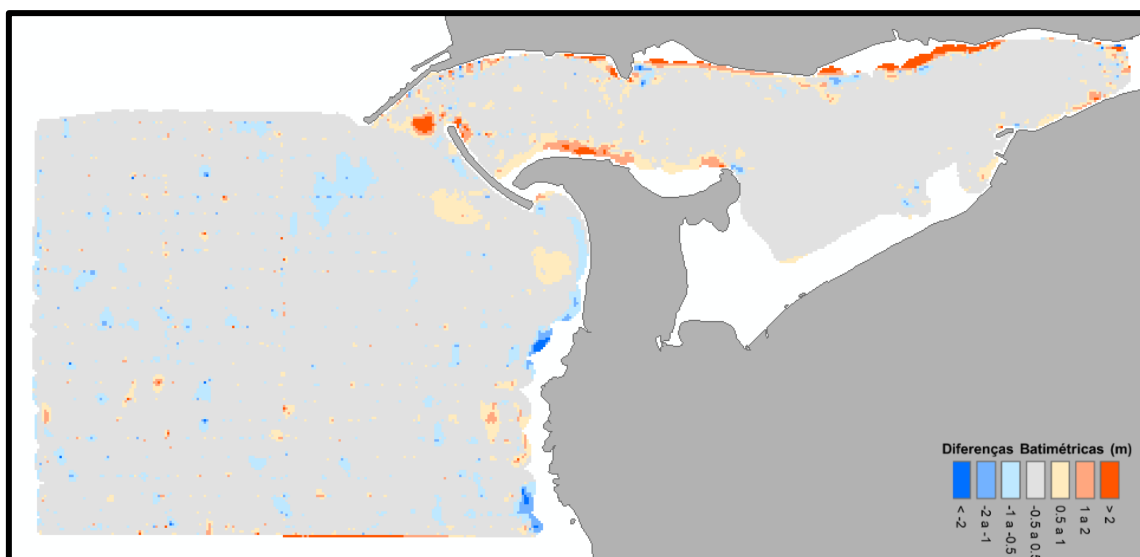


Figura 45 – Diferenças de Batimetria entre janeiro e junho, ArcGIS®.

Da comparação entre dados verifica-se que não existem nem grandes áreas com variações significativas de profundidade nem uma tendência notória generalizada para o período de estudo de 2017, embora haja variações significativas à escala local.

Mais se refere que a principal conclusão a retirar foi que na grande maioria da área de estudo não se verificam variações superiores a meio metro, quer positivas quer negativas (cor cinzento claro nas figuras 43 a 45).

Procedendo à análise dos pontos com variações de profundidade superiores a meio metro, refira-se que a maioria das alterações consiste em variações de pequena escala, pontos isolados, sem estabelecerem entre si uma tendência de correlação. Conclui-se ainda que a origem destas variações prende-se com a insonorização de diferentes pontos, fruto de desvios dos percursos das sondagens. Não obstante a grelha de pesquisa ser a mesma para os três levantamentos, no decurso da execução do levantamento batimétrico verificam-se sempre pequenos desvios de navegação, que podem atingir os 20 m entre linhas, por serem seguidas diferentes rotas de navegação, ou mesmo 90 m, no caso de se verificar necessidade de contornar obstáculos à navegação, ou perante situações em que a agitação marítima não permite a execução total da matriz definida para o levantamento, não sendo possível a aproximação em segurança da embarcação tão próximo da linha de costa como seria necessário. Do exposto, conclui-se que os pontos do fundo do mar ou do leito do rio cuja profundidade foi obtida não se encontram georreferenciados exatamente nas mesmas coordenadas relativamente aos três levantamentos.

Outros fatores que potenciam estes pontos isolados são o espaçamento definido entre linhas da malha do levantamento. Com sondas de feixe simples, não é possível

insonorizar todo o fundo, sendo a malha da pesquisa desenhada, mais ou menos próxima, de acordo com o nível de detalhe que se pretende atingir. A necessidade de maior detalhe, normalmente está associada a zonas de maior dinâmica costeira, a áreas sujeitas a recorrentes variações de profundidade ao longo dos anos e perante o interesse da área em estudo, por exemplo para a navegação de navios de grande porte. Um outro fator prende-se com o facto de ser necessário estimar a profundidade para as áreas não insonorizadas diretamente pelos sonares, sendo necessário recorrer a interpolações.

Análise às variações locais

Procedendo a um enquadramento prévio da Barra do Rio Douro através da mera observação e comparação visual dos dados batimétricos de setembro de 2015 concluímos pela existência de diferentes cotas de profundidade, facto que indicia que a embocadura do Rio Douro tem uma dinâmica de fundos grande, que parte do fundo é constituído por rocha. Veja-se as variações de profundidade entre pontos próximos (3,8 m para 4,2 m; 4,8 para 6,8 m; 7,3 para 5,4 m, 6,3 para 8,0 m; 4,7 para 6 m, ...) e por nos 330 m do enfiamento entre o topo Norte do quebra-mar destacado e a extremidade do molhe Norte a profundidade oscilar entre os 2,3 e os 10,3 m (figura 46).

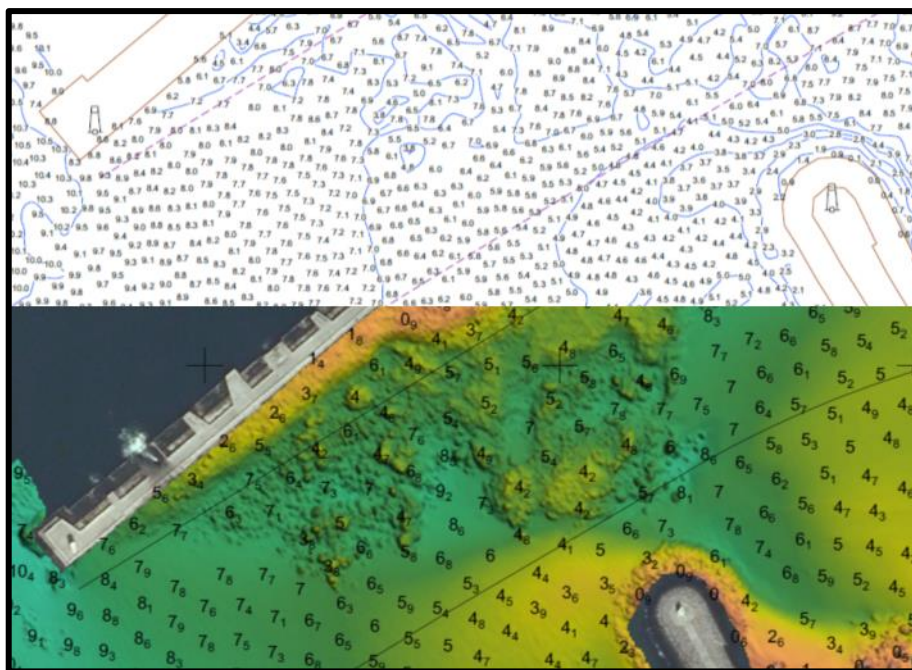


Figura 46 – Carta (em cima) e ortofotomapa (em baixo) do estuário do Douro, Instituto Hidrográfico, VND-EST-001/15ST e VND-EST-001/15MB, setembro 2015 – Escala 1:2 000, sistema de projeção PT-TM06 / Datum ETRS89, unidades em metros referidas ao ZH (situado 2 m abaixo do NMA).

Ao analisarmos as batimetrias de 2016 e 2017 constatamos diferenças de profundidade entre os 5 e os 12 m e mesmo a carta da Navionics® diferenças de profundidade entre os 3,4 e os 10,7 m (figura 47 e 48).

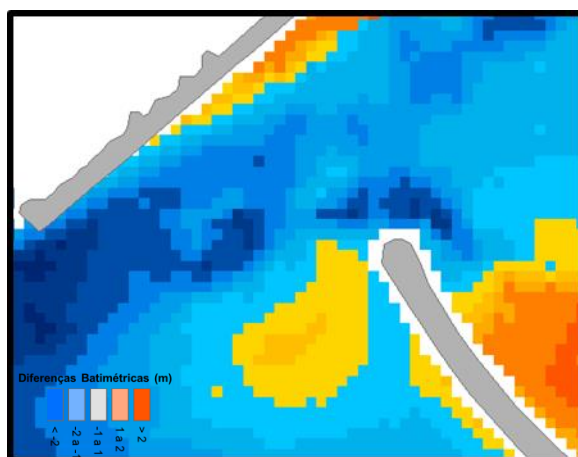


Figura 47 – Batimetrias interpoladas do levantamento de 16 março de 2016, ArcGIS®.



Figura 48 – Carta náutica da Navionics® da embocadura do rio Douro (fonte: <https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@15&key=y%7CzbzFls%7Ds%40> – 10/09/2017).

Da análise às variações de profundidades das batimétricas entre janeiro e junho de 2017 verificou-se um claro assoreamento da Barra do Rio Douro, afetando principalmente o canal de navegação, no enfiamento entre o topo do molhe Sul e o topo do molhe Norte, com perdas de profundidade que chegam a atingir valores superiores a 5 m (coordenadas: -10° 57' 00,231", 38° 24' 40,926" wgs84, 09/01/2017 11,5 m e em 05/06/2017 6,1 m, diferença de 5,4 m) (figura 49). Saliente-se que em janeiro de 2017 a profundidade no referido “enfiamento” variava entre os 5 e os 12 m.

Mais se refira terem sido detetadas duas áreas de assoreamento na zona costeira, exterior ao molhe Sul, oposta à restinga, cuja diminuição da profundidade variou entre os 0,5 e 1 m de profundidade.

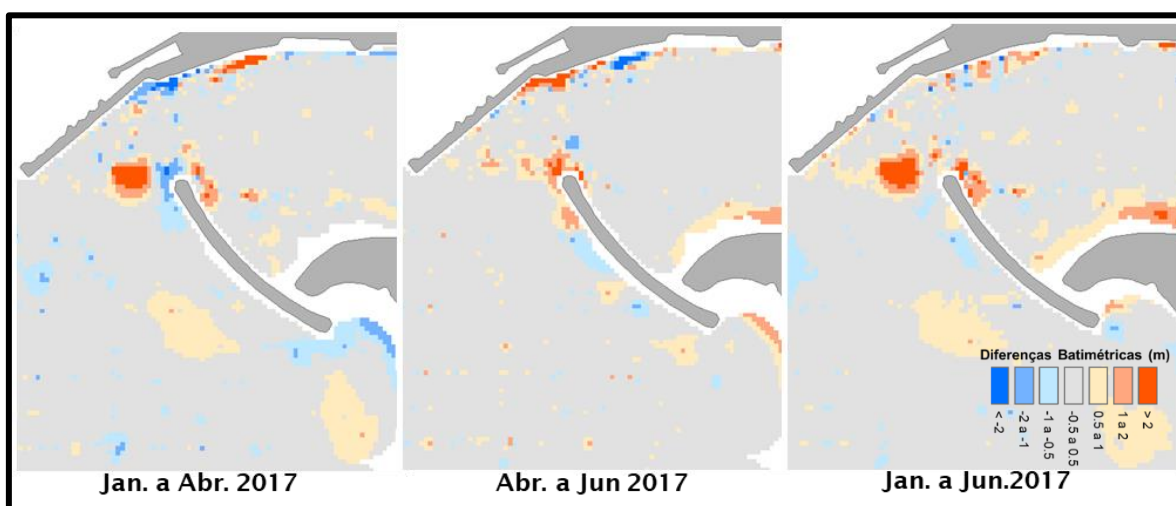


Figura 49 – DMDT's das batimétricas interpoladas na zona exterior da embocadura do Rio Douro: jan. vs abr., abr. vs jun. e jan. vs jun. de 2017, ArcGIS®.

Nas margens do Rio Douro na zona da foz foi também verificado um processo de assoreamento. Na margem direita do Rio Douro, em praticamente toda a extensão entre o Ouro e o início do molhe Norte. Da análise à evolução das diferenças concluímos que se trata de uma área dinâmica em termos sedimentares, verificando-se tendências de evolução opostas (oscilações) para o mesmo segmento da margem entre períodos consecutivos: aumento de profundidade no período de janeiro a abril e um claro processo de assoreamento entre abril e junho e vice-versa (figura 50).

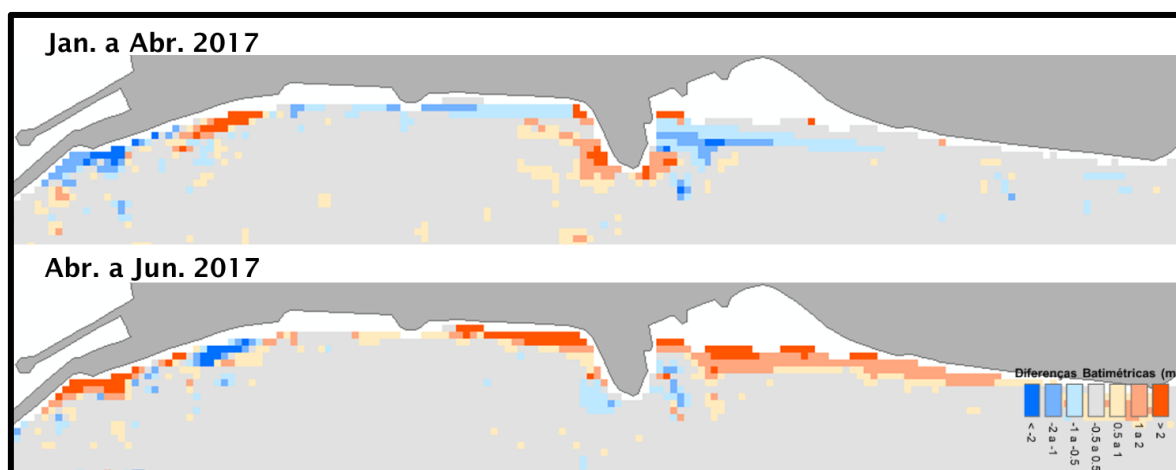


Figura 50 – DMDT's das batimétricas interpoladas na margem direita do Rio Douro, da zona a montante dos Pilotos até ao início do molhe Norte: jan. vs abr. e abr. vs jun. de 2017, ArcGIS®.

Em plena embocadura do rio Douro, a Norte da restinga ocorreu um crescente processo de assoreamento ao longo dos meses, tanto em termos de extensão da área, atingindo em junho uma faixa com extensão de 700 m mais 280 m contíguos (parte exterior do molhe Luiz Gomes Carvalho), como da perda de profundidade, que em alguns pontos chegou a atingir mais de 2 m (coordenadas: -10° 56' 12,032", 38° 24' 33,839" wgs84, 09/01/2017 7,1 m e em 05/06/2017 4,8 m, 2,3 m) (figura 51).

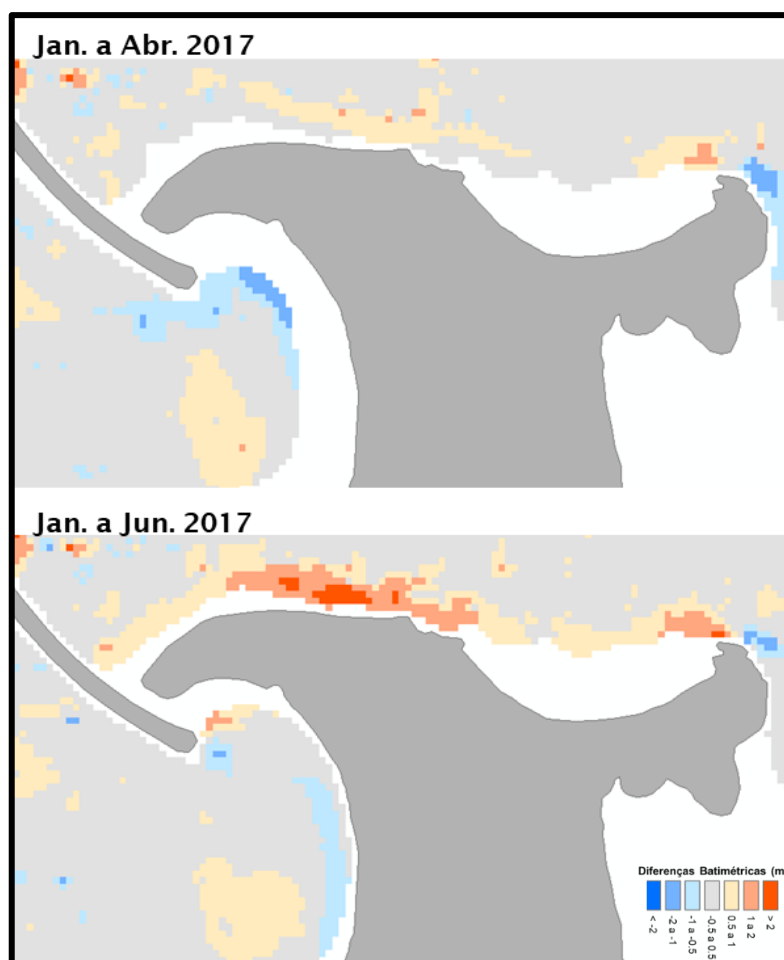


Figura 51 – DMDT's das batimétricas interpoladas no topo Norte da restinga: jan. vs abr. e jan. vs jun. de 2017, ArcGIS®.

No ponto de ligação da restinga ao molhe Sul, tanto no lado do rio como no lado do mar, verifica-se uma dinâmica de crescente assoreamento, diminuindo a profundidade e aumentando a dimensão das áreas com profundidades mais baixas (figura 52). Neste caso concreto, fruto da intervenção humana, construção dos molhes, a restinga formou um tombolo que a liga ao molhe Sul, tendo em 2017 sido verificado um notório ganho de volume dos sedimentos que ligam a restinga ao quebra-mar destacado. Recentemente nem nas maiores preia-mares se verifica à superfície qualquer fluxo de água entre o rio e o mar, via parte interior do molhe Sul, quebra-mar destacado (figura 53), molhe que foi concebido para ser submerso, galgável (IPTM, 2003).

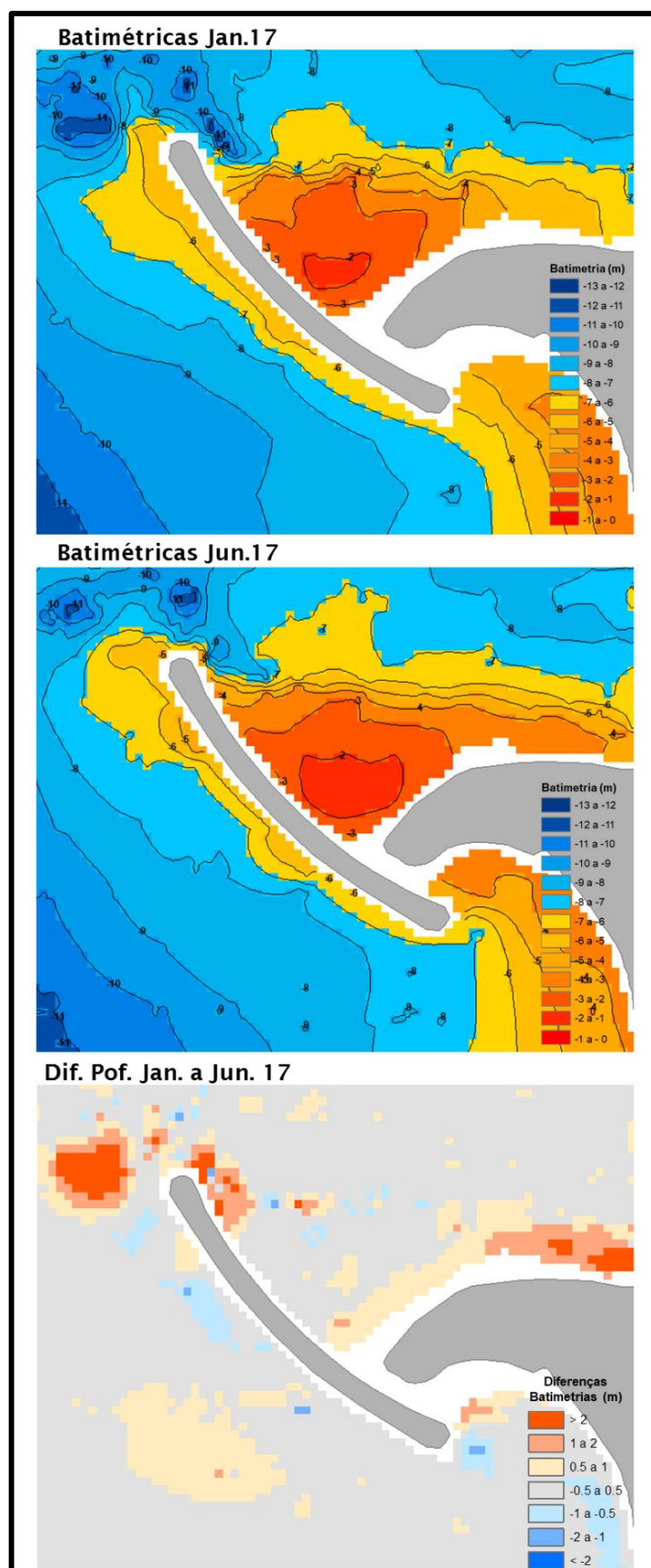


Figura 52 – MDT's e DMDT das batimétricas interpoladas no topo Norte da restinga e na área envolvente ao quebra-mar destacado: jan. vs abr. e jan. vs jun. de 2017, ArcGIS®.

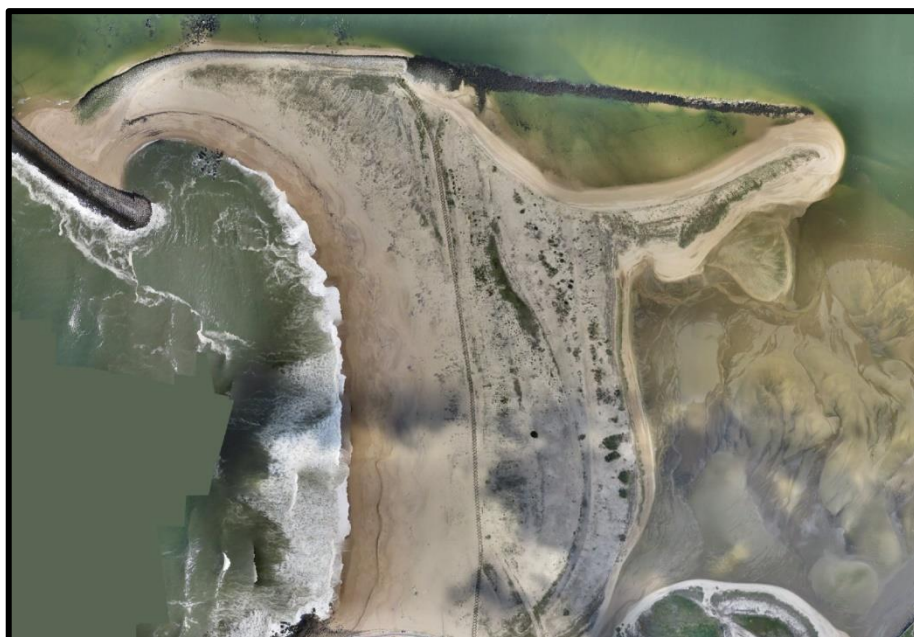


Figura 53 – Mosaico de ortofotos obtidas em 2015 no âmbito de trabalho de campo executados pelo OAUP.

Também na margem direita do Rio Douro, na área envolvente à Ribeira da Granja (que tem 14,4 km de comprimento), ao longo de mais de 800 m, é notório o contínuo processo de assoreamento entre janeiro e abril e entre abril e junho de 2017 (figura 54).

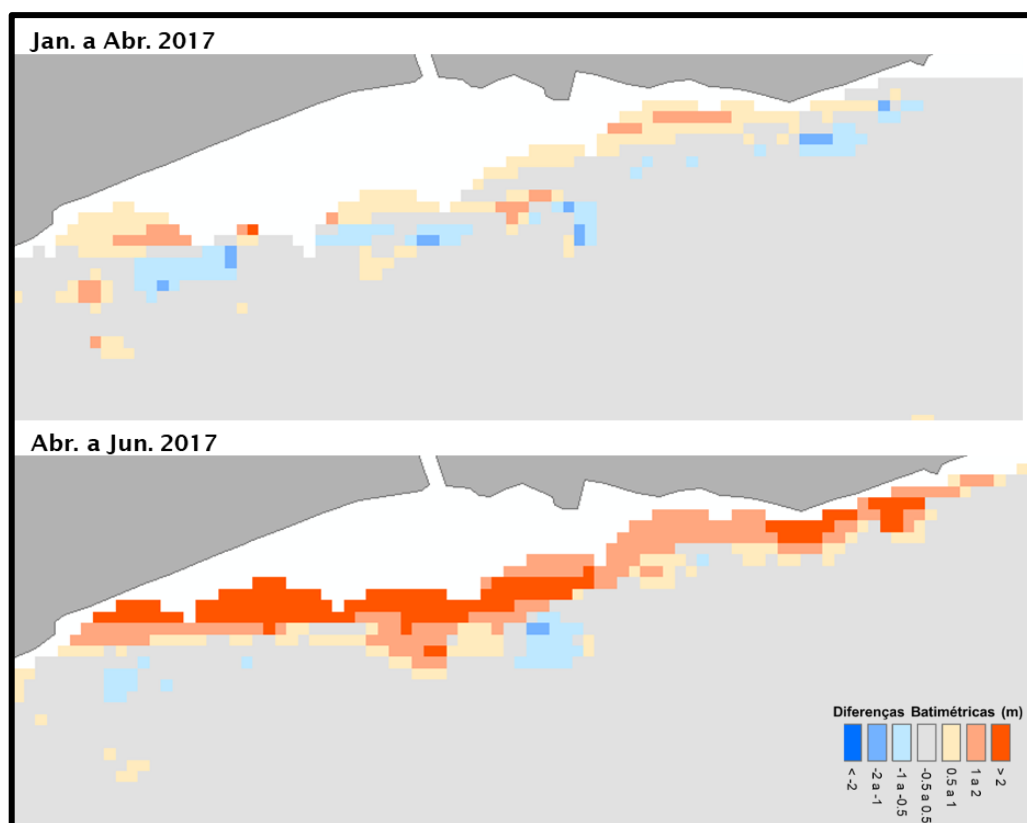


Figura 54 – DMDT's das batimétricas interpoladas na área envolvente à foz da Ribeira da Granja: jan. vs abr. e jan. vs abr. de 2017, ArcGIS®.

4.6 | Batimetria – Dinâmica de Médio Prazo

Da comparação dos três levantamentos batimétricos efetuados propositadamente para esta dissertação com outros dois levantamentos batimétricos, um executado pelo Instituto Hidrográfico, em setembro de 2015, com sonda multifeixe, e o outro efetuado com o mesmo sistema de sonda de feixe simples e com a mesma embarcação, dos três levantamentos de 2017, executado em março de 2016, conseguimos melhor enquadrar temporalmente as nossas conclusões e interpretar no tempo os resultados obtidos.

Análise Temporal das Batimétricas Interpoladas

De setembro de 2015 a março de 2016, verificou-se uma tendência generalizada de aprofundamento do leito do Rio, com principal foco na área da embocadura (figura 55).

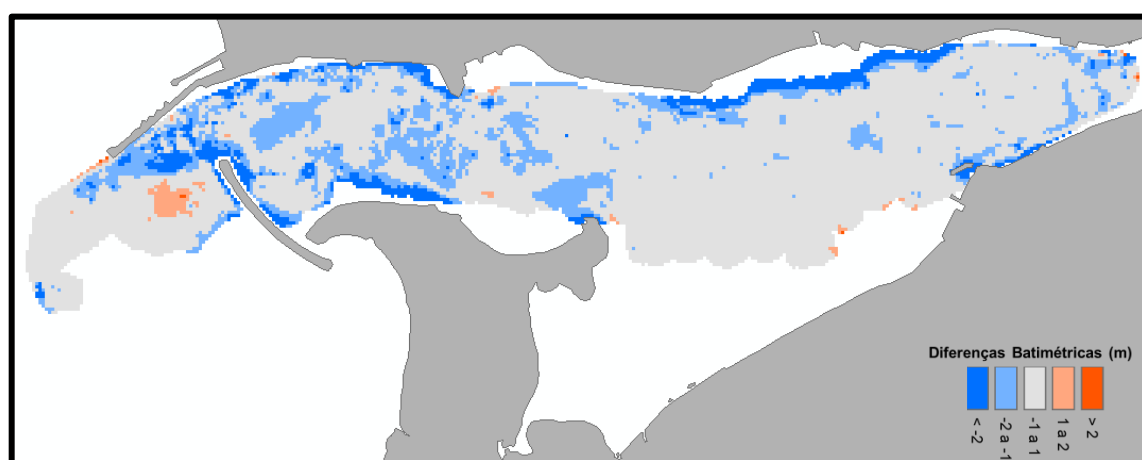


Figura 55 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre setembro 2015 e março 2016, ArcGIS®.

Da análise efetuada conclui-se que o motivo desta tendência generalizada foram os fortes caudais verificados nos três meses iniciais de 2016 (10.480 hm^3 , valor 39% superior à média do caudal total, que comparativamente ao caudal total dos sete primeiros meses de 2017 corresponde ao dobro do volume; em termos homólogos os três primeiros meses de 2016 são os quintos com maior caudal dos 18 anos analisados: 2000-2017). Nestes três meses a média do caudal efluente em Crestuma é de $1.371 \text{ m}^3/\text{s}$, no dia 11 de janeiro foi atingido o valor máximo $5.755 \text{ m}^3/\text{s}$ (no dia anterior o valor foi de $3.356 \text{ m}^3/\text{s}$ e no dia seguinte $3.735 \text{ m}^3/\text{s}$), tendo em 51 dias a média do caudal efluente sido superior a $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na presente comparação entre batimétricas apenas se verificou perda de profundidade numa pequena área situada no exterior do quebra-mar destacado.

Procedendo à comparação das batimetrias de setembro de 2015 com as de janeiro de 2017 continuamos a concluir para uma tendência generalizada para o aumento da profundidade (figura 56).

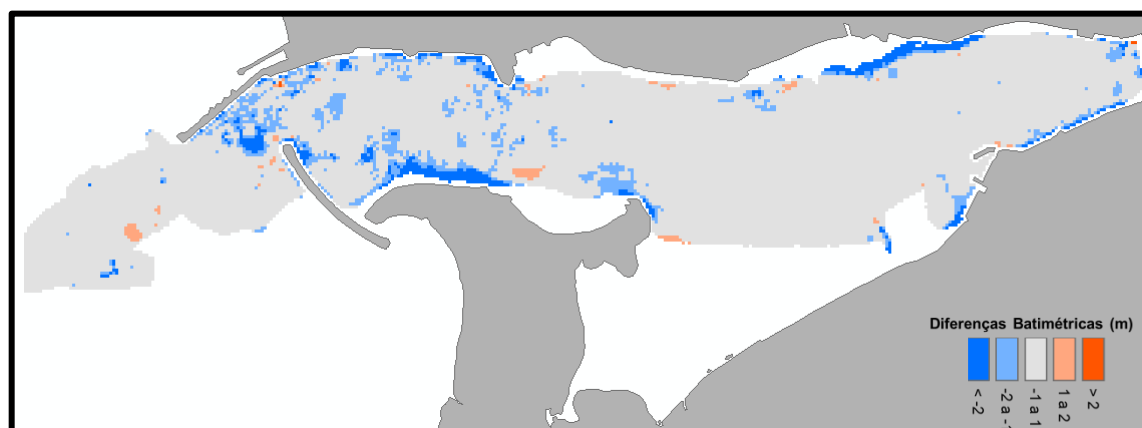


Figura 56 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre setembro 2015 e janeiro 2017, ArcGIS®.

No entanto esta tendência não é tão pronunciada, fruto de alguma reposição de sedimentos ocorrida no segundo semestre de 2016 (caudal médio efluente mensal janeiro a junho 2017 1.267 m³/s e de julho a dezembro 234 m³/s).

Comparando as batimétricas de setembro de 2015 com as de junho de 2017 concluímos pelo contínuo esbatimento das diferenças, tendo a tendência verificada de recuperação das cotas anteriores, em consequência do processo de transporte de sedimentos, quer originários do rio (nos 12 meses de julho de 2016 a junho de 2017 o caudal médio verificado foi de 265 m³/s, valor que procedendo à comparação de caudais corresponde ao 4º caudal mais baixo dos 18 anos em análise) quer fruto da ação da agitação marítima e da ação das marés. No entanto, na grande maioria da área do estudo, o transporte de sedimentos não foi suficiente para repor as cotas existentes em setembro de 2015 (figura 57).

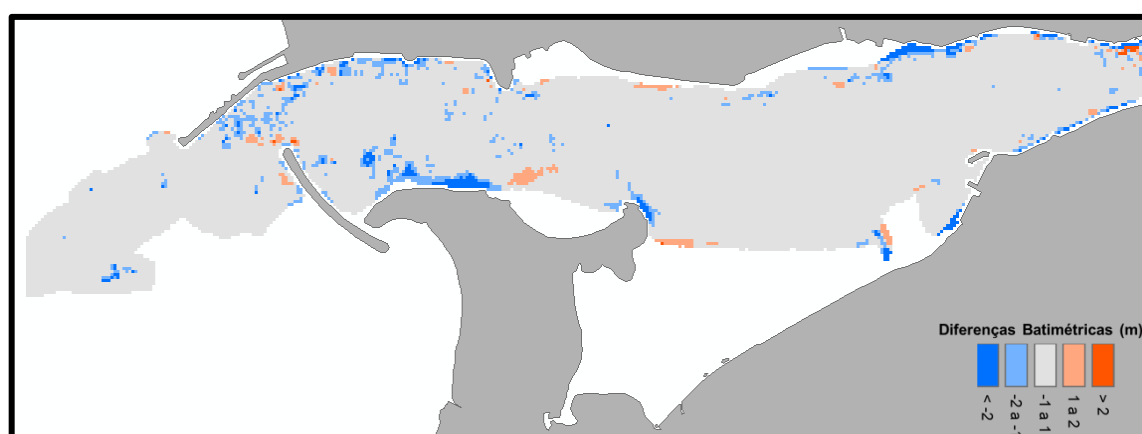


Figura 57 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre setembro 2015 e junho 2017, ArcGIS®.

Da comparação entre os dados das batimétricas de março de 2016 com janeiro e junho de 2017 concluímos estar a ocorrer um crescente processo de assoreamento (figuras 58 e 59).

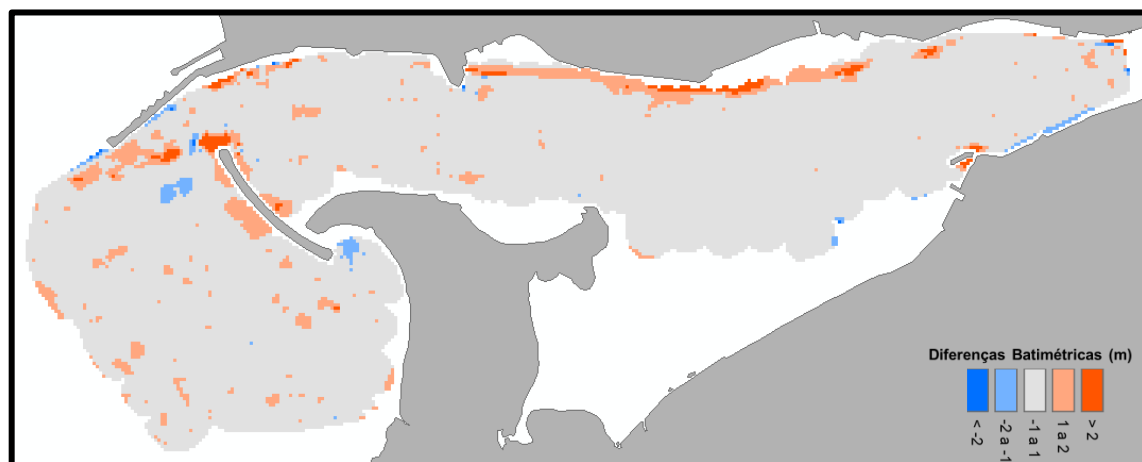


Figura 58 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre março 2016 e janeiro 2017, ArcGIS®.

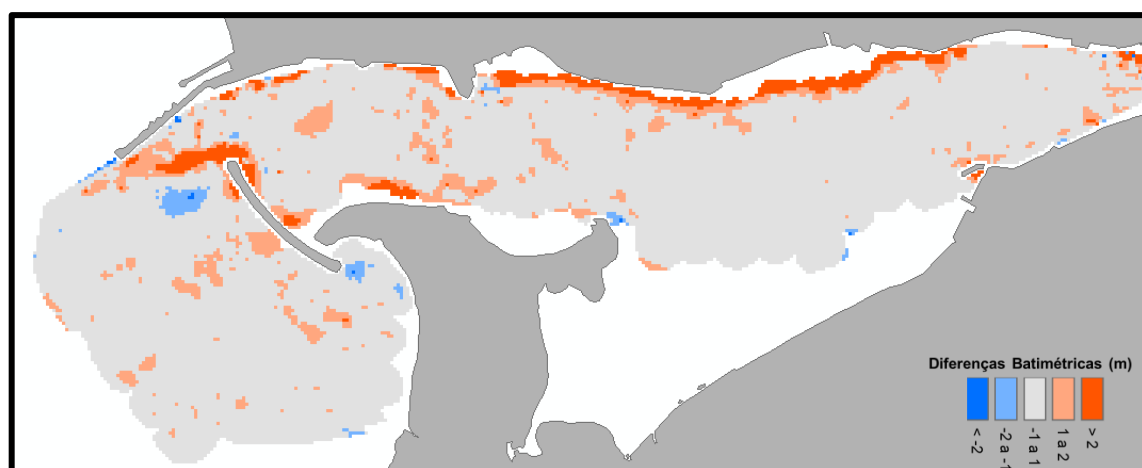


Figura 59 – DMDT's das batimétricas interpoladas da área de estudo comum, variações de profundidade superiores a 1 m entre março 2016 e junho 2017, ArcGIS®.

As comparações efetuadas permitem-nos concluir que as principais áreas em que ocorre dinâmica são a embocadura do Rio Douro, a margem direita do rio entre a Ribeira da Granja e os Pilotos, e a margem esquerda a Norte do topo da restinga. Estas áreas de volatilidade são comuns a todos os mapas de diferenças.

4.7 | Evolução do Volume da Coluna de Água

No sentido de quantificar o volume da coluna de água foram por nós definidas quatro áreas com particular interesse para aferir o sentido da variação e determinar volumes: área exterior à Barra do Douro (Área Exterior), constitui o canal de aproximação à entrada da Barra do Douro; embocadura do Rio Douro (Área Barra), área a montante e a jusante do quebra-mar destacado; zona dos Pilotos (Área Pilotos), entre a área Barra e a

área da Baía de São Paio; zona interior do Rio Douro, entre a Baía de São Paio, margem esquerda, e a foz da Ribeira da Granja, margem direita (Área Baía S.Paio) (figura 60).

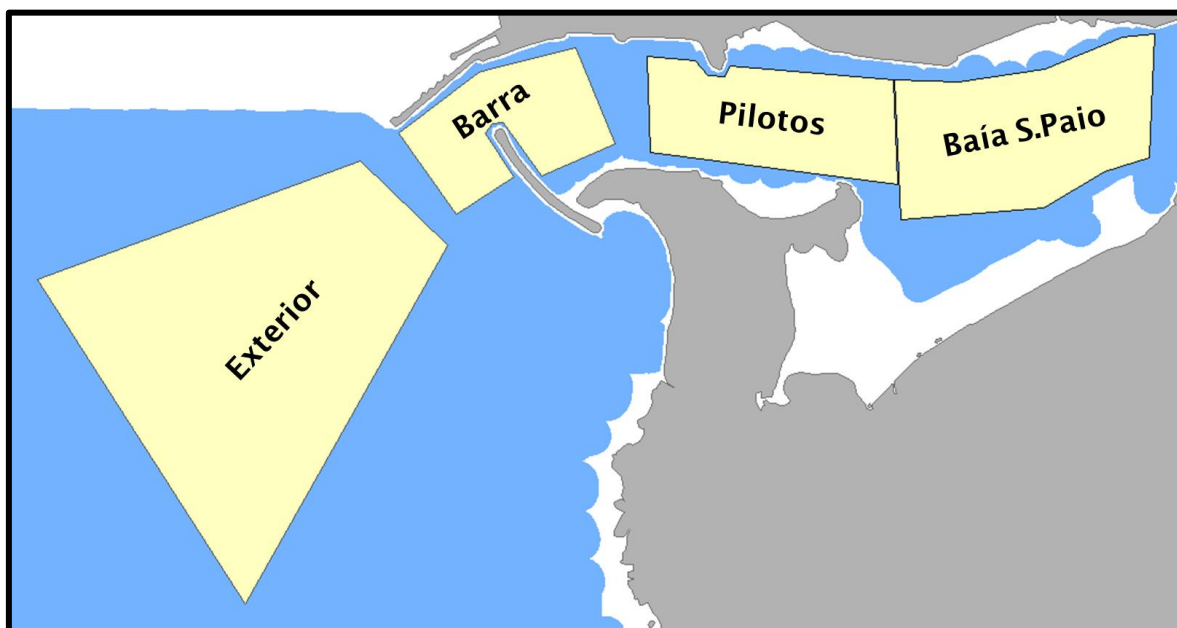


Figura 60 – Definição das zonas de cálculo dos volumes ArcGIS®.

Estas áreas foram delimitadas tendo como critério a obrigatoriedade de possuírem pontos de cobertura comum a todos os levantamentos objeto de análise, tendo da respetiva quantificação resultado as tabelas 8 e A3.

Tabela 8 – Quantificação da área e do volume das zonas seleccionadas, com análise comparativa das respetivas evoluções.

Data	Área Interior Baía S. Paio			Área Pilotos			Área Barra			Área Exterior		
	Área Superfície m ² 359.500			Área Superfície m ² 253.900			Área Superfície m ² 190.000			Área Superfície m ² 950.800		
	Vol. m ³	Δ m ³	% Vol.	Vol. m ³	Δ m ³	% Vol.	Vol. m ³	Δ m ³	% Vol.	Vol. m ³	Δ m ³	% Vol.
Set. 2015	1.737.219			1.580.608			1.404.333					
Mar.2016	1.991.822	254.603	12,8%	1.790.659	210.051	11,7%	1.554.434	150.101	9,7%			
Jan.2017	1.813.703	-178.119	-9,8%	1.679.757	-110.902	-6,6%	1.498.820	-55.614	-3,7%	14.854.229		
Abr.2017	1.782.729	-30.974	-1,7%	1.640.837	-38.920	-2,4%	1.469.766	-29.054	-2,0%	14.993.973	139.744	0,9%
Jun.2017	1.761.413	-21.316	-1,2%	1.620.158	-20.679	-1,3%	1.458.289	-11.477	-0,8%	14.984.392	-9.581	-0,1%
Δ Jan. a Jun. 17		-52.290	-2,9%		-59.599	-3,5%		-40.531	-2,7%		130.163	0,9%
Δ Set. 15 a Jun. 17		24.194	1,4%		39.550	2,5%		53.956	3,8%			

Na Área Exterior à Barra do Douro, de janeiro a junho de 2017, verificou-se um aumento do volume, a profundidade aumentou 130.163 m³, o que corresponde a um acréscimo de 0.9% face ao volume inicial, tendo de janeiro a abril, numa área superior a 950 m², ocorrido um aumento do volume da coluna de água de 15 cm³/m². Esta conclusão é no mesmo sentido da tendência resultante da análise efetuada no ponto 3.5.

Na Área Barra e Pilotos, no período compreendido entre setembro de 2015 e março de 2016 verificou-se um aumento da profundidade de 150.101 m³ (acrécimo do volume de

9,7%) e 210.051 m³ (acréscimo do volume de 11,7%). Não obstante de no período seguinte, março de 2016 a janeiro de 2017 esta tendência se ter invertido, e assim ter permanecido nos períodos seguintes, o valor então atingido ainda influencia a tendência de variação, que se mantém positiva com saldo de 3,8% e 2,5%, respetivamente.

Analisando exclusivamente os levantamentos de 2017, concluímos por uma diminuição da profundidade, tendo no conjunto do período em análise o volume diminuído 40.531 m³ (decréscimo de 2,7%) e 59.599 m³ (decréscimo de 3,5%). Relacionamos o processo de assoreamento com os fracos caudais verificados em 2017 (o caudal total efluente do Rio Douro nos primeiros 6 meses do ano de 2017, 5.076 hm³ é o quarto com menor volume em dezoito anos, correspondendo a 45% da média do caudal total entre 2000 e 2017 (11.221 hm³).

Na Área Baía de São Paio, verificou-se uma tendência de assoreamento de 1,7% entre janeiro e abril e de 1,2% entre abril de junho. Desde março de 2016 o volume da coluna de água diminuiu 11,6%, o que corresponde a uma perda de 230.409 m³, tendo ocorrido uma redução da profundidade de 0,64 m de cada km², verificando-se um contínuo processo de assoreamento de março de 2015 a junho de 2017.

Em suma, face aos dados obtidos conclui-se por uma perda do volume desde março de 2016, pela diminuição da altura da coluna de água, pelo assoreamento das Áreas da Barra, Pilotos e Baía de São Paio e por um aumento ligeiro de profundidade na Área Exterior (figura 61).

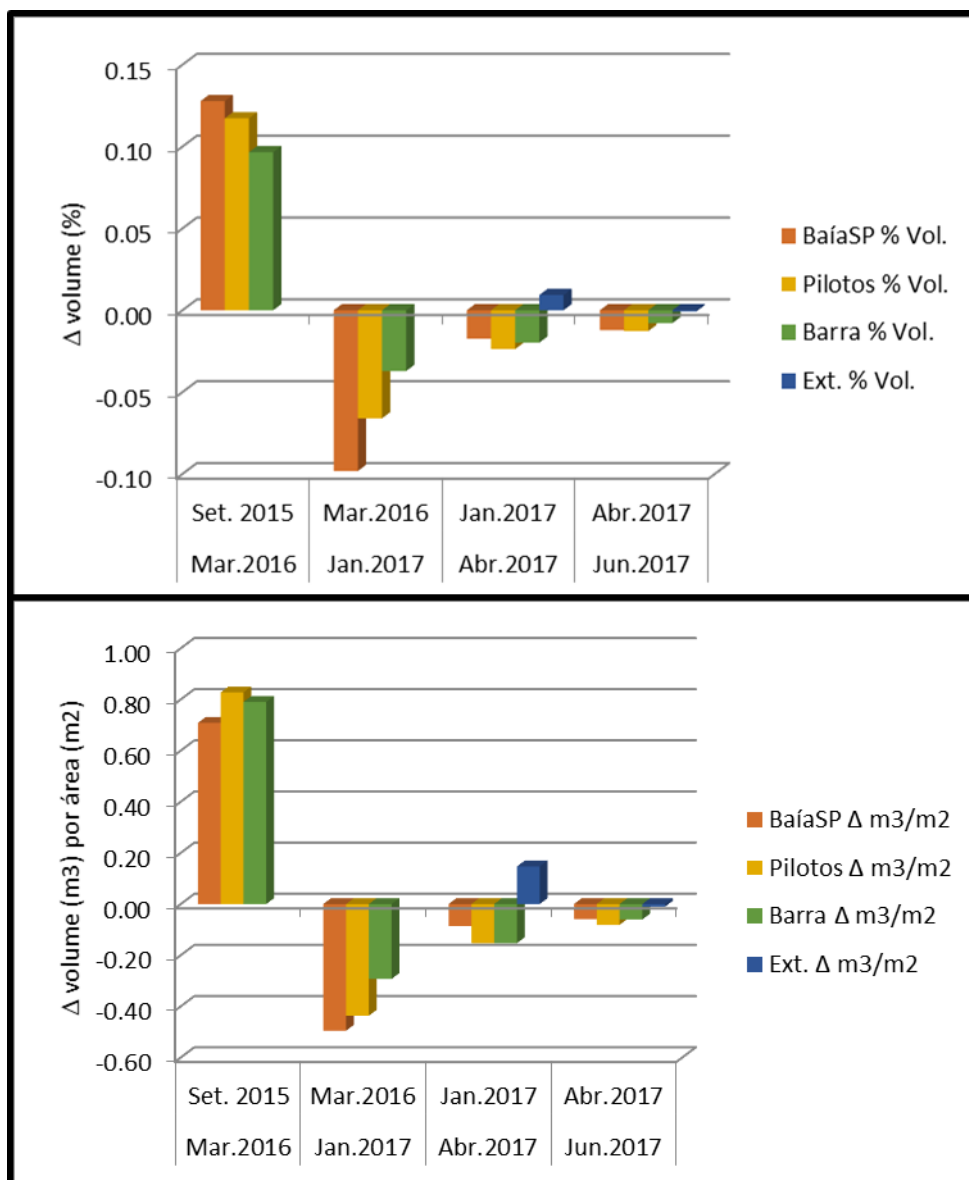


Figura 61 – Variações do volume (cima) e do volume em função da área (baixo) nas zonas selecionadas.

4.8 | Evolução dos Perfis de Profundidade

Com o objetivo de perceber a dinâmica da profundidade nos locais mais estreitos da Barra do Rio Douro foram efetuados três cortes transversais entre as margens Sul e Norte, mais concretamente no enfiamento do quebra-mar destacado com o topo do molhe Norte (Perfil Barra Molhe Norte), do ponto mais estreito entre o quebra-mar destacado e o molhe Norte (Perfil Barra QMDestacado) e na zona dos Pilotos (Perfil Pilotos) (figura 62).



Figura 62 – Definição dos perfis transversais, ArcGIS®.

Relativamente aos perfis transversais “Barra – Molhe Norte” verifica-se uma total homogeneidade da curvatura entre dados de períodos díspares: a curvatura do perfil referente aos levantamentos de setembro de 2015, de abril e de junho de 2017 são idênticas, sendo as de março de 2016 e janeiro de 2017 similares (profundidade média perfil em 2017 = 8,76 m; profundidade média global = 8,94 m) (figura 64).

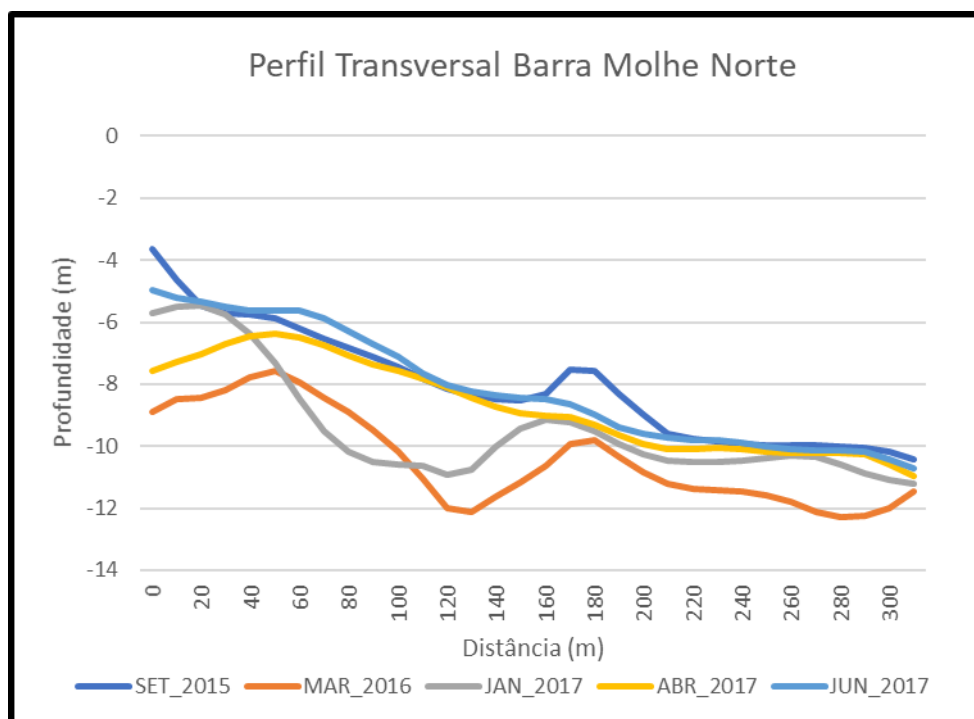


Figura 63 – Perfil Transversal Barra vs Molhe Norte (no sentido O-E), setembro 2015 a junho 2017, ArcGIS®.

Os dados deste perfil são coincidentes com as conclusões que se retiram da análise das figuras 39 e 49, concluindo-se por uma maior profundidade do perfil entre os 40 m e os 160 m em março de 2016 e janeiro de 2017, sendo reposta a cota similar à verificada em

setembro de 2015 em abril de 2017, aumento da profundidade média em 2,37 m de setembro de 2015 a março de 2016 (3,85 m aos 120 m do perfil) e por uma perda de profundidade média de 2,25 m de março de 2016 a junho de 2017 (3,14 m aos 90 m do perfil entre janeiro e abril de 2017). Concluímos então verificarem-se entre os 40 e os 160 m do perfil fenómenos cíclicos de oscilação de profundidades (setembro de 2015, abril e junho de 2017 – perda, março de 2016 e janeiro de 2017 – ganho de profundidade).

Da análise aos perfis da “Barra quebra-mar destacado” a principal conclusão que se retira é de total homogeneidade da curvatura dos perfis de uma margem à outra, apenas existindo uma pequena divergência no perfil “Barra quebra-mar destacado” de março de 2016, entre os 10 e os 70 m do perfil, na proximidade da margem esquerda (figura 63). Relativamente à evolução temporal em 2017, conclui-se por uma ligeira perda de profundidade entre janeiro e junho, tendo entre janeiro e junho a profundidade média do perfil diminuído 0,33 m (profundidade média perfil em 2017 = 7,29 m; profundidade média global = 7,51 m).

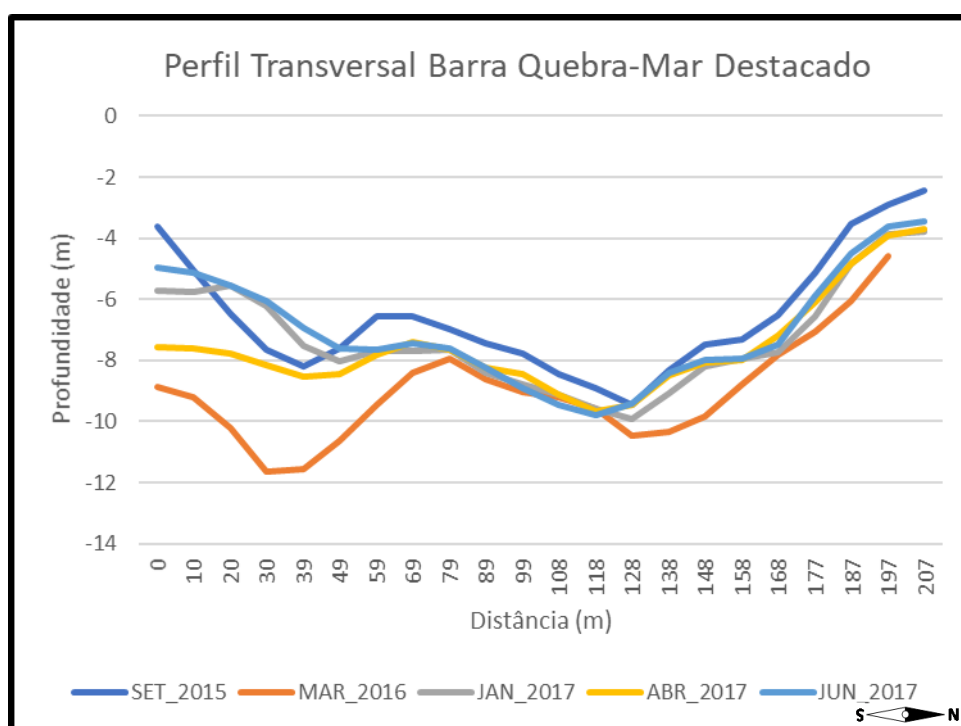


Figura 64 – Perfil Transversal Barra quebra-mar, setembro 2015 a junho 2017, ArcGIS®.

Relativamente ao perfil longitudinal dos Pilotos, verifica-se uma total homogeneidade da curvatura relativamente a todos os levantamentos, sendo a variação máxima entre batimetrias de 1,5 m de profundidade (figura 65). Da análise aos levantamentos de 2017 conclui-se por uma ligeira perda de profundidade de 0,51 m entre janeiro e junho (profundidade média perfil 2017 = 6,59 m; profundidade média global perfil 2017 = 6,54 m).

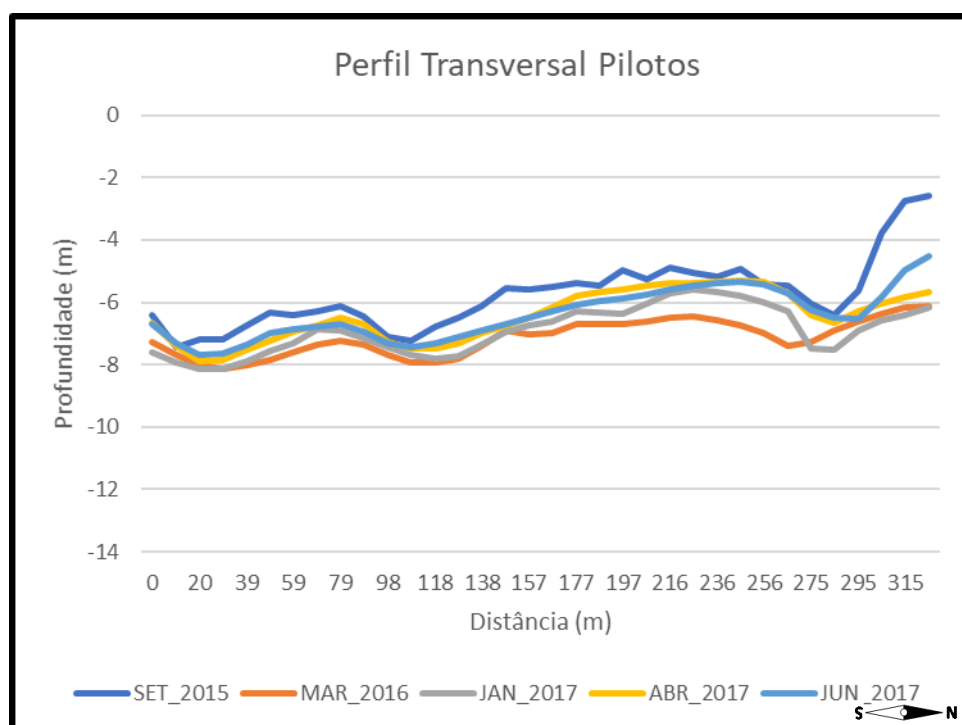


Figura 65 – Perfil transversal Pilotos, setembro 2015 a junho 2017, ArcGIS®.

De acordo com os perfis de profundidade e os levantamentos batimétricos efetuados podemos garantir a navegabilidade da Barra do Douro a navios com calado até 7 m, independentemente da maré, verificando-se o canal de navegação mais estreito no perfil dos Pilotos com 20 m de largura em setembro de 2015 (entre os 10 m e os 30 m do perfil) e em junho de 2017 de duas secções, uma com 29 m (entre os 10 m e os 39 m do perfil) e outra com 30 m (entre os 98 m e os 128 m do perfil) (tabela 9).

Tabela 9 – Análise da profundidade média, mínima e máxima dos Perfis.

		Set_2015	Mar_2016	Jan_2017	Abr_2017	Jun_2017	Δ 2017	Δ Total
Perfil Barra Quebra-Mar	Média	6,65	9,02	7,32	7,55	6,99	7,29	7,51
	Dif_Média		2,37	-1,70	0,23	-0,56	-0,33	0,34
	Prof_Max.	9,44	11,63	9,90	9,67	9,79	9,90	11,63
	Prof_Min.	2,43	4,59	3,78	3,71	3,45	3,45	2,43
Perfil Barra Molhe Norte	Média	8,03	10,40	9,44	8,71	8,14	8,76	8,94
	Dif_Média		2,37	-0,96	-0,73	-0,56	-1,29	0,12
	Prof_Max.	10,44	12,30	11,21	10,96	10,71	11,21	12,30
	Prof_Min.	3,63	7,58	5,47	6,38	4,97	5,47	3,63
Perfil Pilotos	Média	5,77	7,15	6,91	6,45	6,40	6,59	6,54
	Dif_Média		1,38	-0,24	-0,46	-0,05	-0,51	0,63
	Prof_Max.	7,44	8,14	8,15	7,88	7,68	8,15	8,15
	Prof_Min.	2,58	6,11	5,60	5,29	4,52	4,52	2,58

Mais se constata a necessidade de balizar o canal de navegação fruto da permanente oscilação dos pontos do leito do rio com maior profundidade. Relativamente aos navios com calado superior a 6 m, a navegação deve ser condicionada na zona do enfiamento quebra-mar destacado ao topo do molhe Norte até aos 80 m do perfil (dispõem de 230 m para navegar), na área do perfil Barra quebra-mar a navegação deve ser condicionada da margem esquerda até aos 30 m do perfil e na margem direita a 40 m do perfil (dispõem de 137 m para navegar) e na área do perfil Pilotos a navegação deve ser condicionada dos 148 m aos 325 m do perfil.

Para a tipologia de navios definidos como padrão para o Douro, com calado máximo 4,2 m, apenas deve ser condicionada a navegação nos 30 m da margem direita do perfil Pilotos e nos 20 m da margem direita do perfil Barra quebra-mar, estando garantida a navegabilidade da embocadura do Rio Douro independentemente da maré.

CAPÍTULO 5 | DISCUSSÃO

Os **equipamentos e a metodologia** utilizada permitiram uma elevada densidade de medições de boa qualidade, tendo sido obtida uma boa cobertura dos fundos. Os modelos digitais de terreno obtidos reproduzem de forma fiel o relevo subaquático e permitiram uma análise da batimetria estuarina e costeira e da sua morfodinâmica às escalas temporais estudadas (meses e anos).

O recurso a um sistema de posicionamento GPS de precisão com melhor resolução do que o sistema das *plotters* dos sonares que equipam a embarcação de pesquisa permitiu garantir uma maior resolução dos dados relativamente ao posicionamento horizontal da embarcação face ao geoide da Terra.

Relativamente à navegação no início do Estuário do Rio Douro, com base nos levantamentos batimétricos de janeiro, abril e junho de 2017, consubstanciados temporalmente com as batimetrias de setembro de 2015 e março de 2016, conclui-se, tendo em conta a tipologia de embarcações que se pretende que operem no Rio Douro (<90m comprimento; <12m largura; <4,20m calado; <7m águas mortas), que **o ligeiro assoreamento verificado desde 2016 não condiciona a navegabilidade do Douro**, que o canal de navegação da Barra até à Ponte da Arrábida, garantindo em toda a sua área a passagem segura dos navios com **calado máximo inferior a 5 m**. No entanto, conclui-se também que **o canal de navegação continua a estar sujeito a processos de assoreamento**, isto ao contrário do que se encontra definido como uma das vantagens da construção os molhes. Este estudo provou ter **ocorrido assoreamento em plena Barra do Douro com perdas de profundidade, desde março de 2016**: volume da coluna de água: área Pilotos = -10,3%; área Barra = -6,5% (entre janeiro e junho de 2017: área Pilotos = -3,6%; área Barra = -2,8%); perfis transversais: Pilotos = - 0,75 m; Barra quebra-mar destacado = - 2,03 m; Barra molhe Norte = - 2,25 m (entre janeiro e junho de 2017: Pilotos = - 0,51 m; Barra quebra-mar destacado = - 0,33 m; Barra molhe Norte = - 1,29 m). Destes pontos assume particular relevância a perda de profundidade verificada entre janeiro e junho a Norte do quebra-mar destacado, com diminuições da coluna de água de valores superiores a 5 m.

São necessários **estudos no sentido de permitir relacionar objetivamente a hipótese de o assoreamento do canal de navegação ocorrer em períodos temporais de reduzidos caudais**, verificando-se o oposto quando ocorrem caudais elevados, aumento a profundidade no canal em consequência do transporte de sedimentos provocados pela velocidade anormal da corrente do Rio Douro.

Relativamente ao fenómeno de assoreamento contínuo das margens na foz do Rio Douro a acumulação de inertes é particularmente notória na margem esquerda, na **Baía de São Paio** e na **restinga**. Na **área de estudo** definida na **Baía de São Paio**, comum a todos os levantamentos, **verifica-se desde março de 2016 uma perda de 11,6% do volume da coluna de água**, diminuição de 230.409 m^3 , tendo **por cada metro quadrado de superfície da área em estudo ocorrido uma perda média de profundidade de $0,64 \text{ m}^3$** (entre janeiro e junho de 2017 verificou-se uma **perda de 2,9% do volume da coluna de água**, diminuição de 52.290 m^3 , tendo **por cada metro quadrado de superfície da área em estudo ocorrido uma perda média de profundidade de $0,07 \text{ m}^3$**).

Quanto à **restinga o aumento da área e do volume é notório e contínuo desde o final da construção dos molhes do Rio Douro**, tendo a altura máxima crescido **72 cm**, a **área aumentando 46,5%** (341.494 m^2) e o **volume 78,8%** (727.487 m^3). Distribuindo este valor de forma linear pelos 10 anos decorridos, concluímos que de 2007 a 2017 ocorreu um aumento médio ano do volume da restinga de aproximadamente 7,9% (72.749 m^3).

Face às evoluções verificadas na batimetria conclui-se por uma **efetiva necessidade de monitorização permanente, quer entre a Baía de São Paio (margem esquerda), quer a área interior do quebra-mar destacado**, que de destacado só tem o nome, visto estar ligado de forma “permanente” à restinga. Os dados obtidos devem ser analisados de forma integrada com os estudos geomorfológicos que têm vindo a ser executados à restinga.

Do presente trabalho resultam ainda evidências claras de uma tendência de assoreamento entre margem opostas entre a Baía de São Paio (margem esquerda) e a área envolvente à foz da Ribeira da Granja tendo vindo a exercer uma crescente pressão sobre o canal de navegação.

Relativamente à **embocadura do rio Douro, resultam do presente trabalho vários indicadores de áreas de constrangimento** sujeitas a crescentes perdas de volume, fruto de **processos contínuos de assoreamento**, que além de influenciarem o canal de navegação, em consequência do estreitamento da embocadura do Rio Douro, restringem a única via de “canalização” do leito do rio para águas abertas. Única via, visto que no passado a restinga, em situações de caudais de cheia, **funcionava como fusível**, rompendo quando a pressão provocada pelo rio era excessiva. Veloso-Gomes em 2010, **já salvaguardava a necessidade de garantir que não fosse ultrapassada uma cota**, junto ao enraizamento do molhe Sul, **de forma a permitir o funcionamento da restinga como via complementar de canalização dos caudais excessivos para o mar**. No entanto considerando o contínuo crescimento da formação arenosa e a não adoção de

qualquer medida corretiva ao longo dos anos, Peixoto et al. (2016) conclui que **a restinga dificilmente voltará a funcionar como “fusível”**.

Ou seja, atualmente a altura que a coluna de água do rio tem que atingir para se verificar o rompimento da restinga e garantir o mais rápido escoamento dos caudais excessivos do Rio Douro, originará que a montante, nomeadamente no centro histórico do Porto e de Gaia, seja atingida uma altura da coluna de água ainda superior, fruto da dinâmica estuarina local (nomeadamente: largura canal, profundidade, velocidade, marés), o que originará avultados danos.

Ressalve-se, no entanto, que a construção das barragens, a gestão da respetiva bacia hidrográfica e a construção dos molhes, diminuíram drasticamente a probabilidade de serem atingidos valores de caudais tão elevados como os verificados no passado (18.000 m³/s 1739, 16.700 m³/s 1909 e 15.700 m³/s 1962) (Aires et al., 2000).

Da análise aos últimos 18 anos dos caudais do Rio Douro concluímos que o caudal efluente máximo registado foi de 9.207 m³/s em 2001, que apenas em 6 anos dos 18 anos se verificaram caudais superiores a 5.000 m³/s (2000 = 2 dias; 2001 = 19 dias; 2002 = 2 dias; 2003 = 1 dia; 2010 = 1 dia; 2016 = 1 dia) não se registando desde o ano de 2003 volumes superiores a 7.222 m³/s. Desde a data em que o quebra-mar destacado e o molhe Norte ganharam a sua forma atual, 2007, que se registaram volumes anuais do caudal total efluente em Crestuma elevados: 25.285 hm³ em 2010 (3º ano com mais caudal dos 18 últimos anos), 23.623 hm³ em 2016 (4º ano com mais caudal dos 18 últimos anos) e 23.148 hm³ em 2014 (5º ano com mais caudal dos 18 últimos anos), tendo os molhes demonstrando capacidade para suportarem volumes grandes de água em dias consecutivos, tendo até agora, garantido o escoamento necessário. No entanto saliente-se que desde 2007 o volume diário apenas foi superior a 5.000 m³/s em dois dias. Não obstante o referido, principalmente **tendo em conta a dimensão da bacia hidrográfica, devem ser ressalvadas situações de caudais extremos**. Os dados históricos mostram que em janeiro de 2001 o caudal total efluente foi de 10.856 hm³ (caudal médio dia 4.053 m³/s e caudal máximo 9.207 m³/s) e em março de 2001 o caudal total efluente foi de 11.927 hm³ (caudal médio dia 4.453 m³/s e caudal máximo 8.901 m³/s). A soma do caudal destes dois meses juntos, por si só é comparável a anos inteiros, sendo mesmo assim o 6º período com maior caudal. Comparando um destes meses isolado com anos completos concluímos que o volume de água de um destes meses foi superior ao caudal total anual de cinco dos anos do período em análise.

Consequentemente, tendo em conta os volumes passados, **deve ser garantido que a hidrodinâmica da Barra do Rio Douro tem capacidade de escoamento necessário provocando o menor volume de danos possíveis nas zonas ribeirinhas a montante**.

Face ao supra exposto devem ser tomadas as medidas corretivas necessárias de forma a evitar que no futuro próximo, **fruto da incapacidade de canalizar água para o mar e da resistência da restinga**, o volume a montante não atinja níveis desmesurados que originem inundações e potenciem a ocorrência de prejuízos e mesmo de perdas humanas. Consequentemente devem ser **estabelecidos limites máximos da área e volume da restinga, definidas cotas mínimas da profundidade do leito do rio e volumes mínimos**, de forma a salvaguardar a hidrografia estuarina.

No sentido de monitorizar e quantificar a acumulação de inertes em toda a zona estuarina, desde a ponte da Arrábida até aos 2 000 m da linha de costa em toda a área envolvente à Barra do Douro, área particularmente volátil, sugere-se que **sejam efetuados levantamentos batimétricos cíclicos** (trimestrais ou semestrais), de forma a obter a perceção exata da morfodinâmica do leito do rio e do fundo marinho, procurando quantificar o processo de transporte de sedimentos, no sentido de perceber alterações e de estimar a sua evolução, de forma a avaliar e garantir a navegabilidade da Barra do Rio Douro em plena segurança (redefinindo/ajustando o canal, avaliando a necessidade da remoção de inertes, implementando restrições à navegação, ...).

Existindo dados batimétricos e reunindo dados de caudais, ondulação, marés, circulação estuarina, sugere-se que **seja construído um modelo hidrodinâmico do estuário do Douro, adaptável aos diferentes parâmetros e condicionantes**, permitindo que seja assegurada a permanente salvaguarda da navegação, que garanta a contínua renovação da água no estuário, que possibilite o escoamento dos caudais excessivos para o mar e minimize os impactos nos ecossistemas locais.

Para a gestão do caudal é crucial **deter um papel ativo na gestão e controlo das várias albufeiras existentes na bacia hidrográfica do Rio Douro**, controlada a respetiva capacidade de retenção e conciliando as necessidades de “descarga” das barragens. Quando **ultrapassados os limites de assoreamento**, ou a deposição de inertes impossibilite que se verifiquem os níveis mínimos de circulação, ou **potenciem o estrangulamento da via**, ou for **ultrapassada a área ou o volume da restinga**, devem ser adotadas **medidas corretivas, nomeadamente a remoção de inertes**, podendo estes **ser recolocados em zonas costeiras próximas**, ajudando a combater os efeitos da erosão costeira, muito provocados de forma artificial pela intervenção humana.

CAPÍTULO 6 | CONCLUSÕES

Navegação

O canal de navegação da Barra até à Ponte da Arrábida garante a passagem segura dos navios com calado inferior a 5 m (tipologia de embarcações definidas para navegar no Rio Douro: <90m comprimento; <12m largura; <4,20m calado; <7m águas mortas).

Assoreamento

Conclui-se pelo assoreamento no estuário do Rio Douro desde março de 2016. Na Barra do Rio Douro foram quantificadas perdas de profundidade significativas (área Pilotos= -10,3%; área Barra= -6,5%; área Baía São Paio = -11,6%) (perfis: Pilotos= -0,75 m; Barra quebra-mar= -2,03 m; Barra molhe Norte = -2,25 m). Mesmo relativamente à dinâmica de curto prazo entre janeiro e junho de 2017 na área a Norte do quebra-mar destacado verificaram-se perdas de profundidade superiores a 5 m.

Relativamente ao canal de navegação concluímos por uma **continua tendência de perda de volume**, sendo particularmente notória a **zona de pressão situada em margens opostas entre a Baía de São Paio e a foz da Ribeira da Granja**.

Restinga

O aumento da **área e do volume da restinga** é contínuo desde a construção dos **molhes** (altura máxima cresceu 72 cm, área aumentando 46,5% e o volume 78,8%), fator que associado **ao aumento do volume dos sedimentos nas zonas intertidais limítrofes**, torna a restinga uma **barreira praticamente intransponível**.

Perspetivas Futuras

O **processo contínuo de assoreamento da embocadura do rio Douro** além de influenciar o canal de navegação, restringe a única via de “canalização” do leito do rio para águas abertas, devendo ser **estabelecidos limites máximos da área e volume da restinga**, e definidas **cotas mínimas da profundidade**, volumes mínimos da coluna de água, de forma a **salvaguardar a hidrografia estuarina**, garantido que a hidrodinâmica da Barra do Rio Douro tem **capacidade de escoamento necessário**.

Modelo Hidrodinâmico

Sugere-se que **seja construído um modelo hidrodinâmico do estuário do Douro**, reunindo dados batimétricos, caudais, ondulação, marés, e fatores atmosféricos, **adaptável de forma dinâmica aos diferentes parâmetros e condicionantes**, permitindo que seja assegurada a **permanente monitorização e implementação de**

medidas corretivas (nomeadamente a remoção de inertes) de forma a salvaguardar a navegação, garantir a contínua renovação da água no estuário, possibilitar o escoamento dos caudais excessivos e minimizar os impactos nos ecossistemas locais.

Estudos Complementares

São necessários **estudos complementares**, com **maior abrangência temporal**, no sentido de permitir demonstrar a **relação entre o assoreamento e os reduzidos caudais do Rio Douro**.

CAPÍTULO 7 | LIMITAÇÕES

Como limitações ao presente estudo refiram-se: a impossibilidade de acesso a uma tecnologia sonar mais avançada, sonar multifeixe; a falta de informação sobre os procedimentos seguidos pelo Instituto hidrográfico na conversão das sondagens brutas em pontos relativamente ao levantamento batimétrico de setembro de 2015; a recusa da Navionics® em explicitar o método seguido para fazer a correção da amplitude da maré às sondas hora por nós disponibilizadas relativamente ao levantamento de março de 2016; a definição de um método de interpolação dos dados das batimetrias que melhor se ajuste às características do estuário do Rio Douro, podendo no futuro ser desenvolvido um método de interpolação específico de forma a permitir reduzir erros de interpolação.

Aproximadamente um mês após o fim do último levantamento foram efetuados trabalhos de dragagem parcial, maioritariamente no canal de navegação, sendo os respetivos inertes removidos e recolocados em zonas em ambiente marinho.

| REFERÊNCIAS

- Agência Portuguesa do Ambiente – APA (2016). *Plano de Gestão de Região Hidrográfica, Parte 2 – Caracterização e Diagnóstico, Região Hidrográfica do Douro (RH3)*. 213.
- Aires, C., D. Pereira, T. Azevedo (2000). *Inundações do rio Douro: dados históricos e hidrológicos*. I Jornadas do Quaternário da APEQ, Porto, 3.
- Almeida, J. (2013). *Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar do estuário do Rio Douro*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Azevedo, I., P. Duarte, A. Bordalo (2008). *Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a mesotidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 76(3), 620-633.
- Azuike, C., S. Pe'eri, A. Alexande, A. Armstrong, C. Parrish (2012). *Development of a geospatial analysis methodology for assessing the adequacy of hydrographic surveying and nautical charting*. Conferência hidrográfica de Niagara Falls, 15–17.
- Bastos, L., A. Bio, J.L.S. Pinho, H. Granja, A. J. Silva (2012). *Dynamics of the Douro estuary barrier sand spit before and after breakwater construction*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 109: 53-69.
- Bio, A., L. Bastos, H. Granja, J.L.S. Pinho, J.A. Gonçalves, R. Henriques, S. Madeira, A. Magalhães, D. Rodrigues (2014). *Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two portuguese case studies*. Journal of Integrated Coastal Management 15(1): 47-63.
- Brennan C.W. (2009). *Basic Acoustic Theory / Multibeam Surveying*. R2Sonic LLC, multibeam training, technical manual, 16.
- Brissette, M. (2012). *The Unsuitability of Non-centimetric Positioning for Shallow-water MBES Surveys – Stop Using DGPS!* Hydro International, article, <https://www.hydro-international.com/content/article/stop-using-dgps>, Nov..
- Brock, J., S. Purkis (2009). *The emerging role of lidar remote sensing in coastal research and resource management*. Journal of Coastal Research, 1-5.
- Chust, G., M. Grande, I. Galparsoro, A. Uriarte, Á. Borja (2010). *Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: a case study within a Basque estuary*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 89, 200-213.
- Coelho C, Silva R, Veloso-Gomes F, Taveira-Pinto F (2009). *Potential effects of climate change on northwest Portuguese coastal zones*. ICES, Sci 66, p.1497–1507.
- Coggan, R., M. Diesing (2011). *The seabed habitats of the central English Channel: A generation on from Holme and Cabioch, how do their interpretations match-up to modern mapping techniques?* Continental Shelf Research, 31(2), S132-S150.
- Colbo, K., T. Ross, C. Brown, T. Weber (2014). *A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 145, 41-56.

Costa, B., T. Battista, S. Pittman (2009). *Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam Sonar bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems*. Remote Sensing of Environment, 113.5, 1082-1100.

Eakins, B.W., G.F. Sharman (2010). *Volumes of the World's Oceans from ETOPO1*. NOAA National Geophysical Data Center, 3.

Edward J. (2016). *It All Starts with Hydrographic Charting*. Fugro Survey Division – Americas Region, 2.

EL-Hattab, A. (2014). *Single beam bathymetric data modelling techniques for accurate maintenance dredging*. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 17(2), 189-195.

Elvenes, S., M. Dolan, P. Buhl-Mortensen, V. Bellec (2014). *An evaluation of compiled single-beam bathymetry data as a basis for regional sediment and biotope mapping*. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 71(4), 867-881.

Fairway Danube (2016). *State of the art analysis on equipment for hydrological servisse*. Report, version: v.07, 49-92.

Gomes A., A. Ramos-Pereira, A. Araújo, M. Sousa, F. Veloso-Gomes (2006). *Douro's Estuary Dynamics. Portugal: Coastal Dynamics*. Associação Portuguesa de Geomorfólogos, 25,30.

Granja, H., L. Bastos, J. Pinho, J. Gonçalves, R. Henriques, J. Mendes, A. Magalhães (2011). *Programa multidisciplinar de monitorização de curto termo para apoio ao planeamento e gestão da zona costeira*. VI Congresso Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa.

Horta, J., A. Pacheco, D. Moura, O. Ferreira (2014). *Can recreational echosounder-chartplotter systems be used to perform accurate nearshore bathymetric surveys?* Ocean Dynamics, 64(11), 1555-1567.

Howlett C. (2013). *Stop Using DGPS!* Hydro International, 2.

Hoy S., K. Kissinger (2010). *Multibeam Calibration: Conducting a Patch Test NOAA Ship Okeanos Explorer*. OER Interns, NOAA.

IHO – International Hydrographic Organization (2008). *IHO Standards for Hydrographic Surveys – Special Publication N.º 44, 5th ed*. International Hydrographic Bureau.

Innangi S., A. Bonanno, R. Tonielli, F. Gerlotto, M. Innangi, S. Mazzola (2016). *High resolution 3-D shapes of fish schools: A new method to use the water column backscatter from hydrographic MultiBeam Echo Sounders*. Applied Acoustics, 111, 148-160.

Instituto Hidrográfico – Portugal (2010). *Manual de Hidrografia – Publicação C-13 – 1ª Edição. Versão traduzida para Português, original: Manual on Hydrography, IHO PUBLICATION C-13*. International Hydrographic Bureau.

Instituto Hidrográfico – Portugal (2015). *Relatório TF HI 17/15*. Volume 1 de 6.

Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos – IPTM (2003). *Relatório Final do Estudo de Impacte Ambiental do Projecto das Obras de Melhoria da Acessibilidade e Segurança da Barra do Douro*.

Jalali, M., D. Ierodiaconou, J. Monk, H. Gorfine, A. Rattray (2015). *Predictive mapping of abalone fishing grounds using remotely-sensed LiDAR and commercial catch data*. Fisheries Research, 169, 26-36.

James, L., M. Hodgson, S. Ghoshal, M. Latiolais (2012). *Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis*. Geomorphology, 137(1), 181-198.

James, S. (2015). *Magnetic Anomalies at the World's Largest Volcano – On Our Way and Already mapping*. Schmidt Ocean Institute.

Kashani, A., M. Olsen, C. Parrish, N. Wilson (2015). *A review of LIDAR radiometric processing: from Ad Hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration*. Sensors, 15, 28099-28128.

Kogut, T., J. Niemeyer, A. Bujakiewicz (2016). *Neural networks for the generation of sea bed models using airborne lidar bathymetry data*. Geodesy and Cartography, 65(1), 41-54.

Lecours V., M. Dolan, A. Micallef, V. Lucieer (2016). *A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor*. Hydrology and Earth System Sciences, Lowrance, Sonar Tutorial, Article ID: 2967.

Lurton, X. (2010). *An Introduction to Underwater Acoustics Principles And Applications*. Springer, second edition, 1-16; 271-356.

Main, D. (2016a). *A Quest to Map the Seafloor by 2030*. Magazine Newsweek, Set. 29.

Main, D. (2016b). *Largely unknown planet earth*. Afrweekend – International Business Times, The Washington Post, Newspaper, Oct. 11.

Mann, D. (2013). *Multi-beam Echo Sounders New Technology, New Capabilities and New Markets*. Hydro International, article, Mar. 26.

Merwade, V., A. Cook, J. Coonrod (2008). *GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping*. Environmental Modelling & Software, 23(10), 1300-1311.

NOAA (2014). *Field Procedures Manual. National Oceanic and Atmospheric Administration*. Office of Coast Survey, Apr. 635.

NOAA (2017). *Hydrographic Survey Specifications and Deliverables*. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Apr. 162.

Parnum I., A. Gavrilov (2011). *High-frequency multibeam echo-sounder measurements of seafloor backscatter in shallow water: Part 1 – Data acquisition and processing*. Underw Technol Int J Soc Underw, 30, 3–12.

Parsons S., G. Bondt, A. Craft, J. Cunningham, M. MacDonald, D. Ventura (2015). *Recognized Gains When Utilizing Airborne LiDAR Bathymetry Prior to a Multibeam Survey*. Conference U.S. Hydro 2015, Hypack.

Peixoto, R., I Iglesias, P. Avilez-Valente (2016). *Efeito dos molhes do Douro em Diferentes cenários de cheia na cidade do Porto, Portugal*. ResearchGate, ACT6, 31-43.

Sanders P. (2011). *S-44 for Dummies*. Hypack, web page publication, Nov.

Santos, I., A.C. Teodoro, F. Taveira-Pinto (2010). *Análise da evolução morfológica da restinga do Rio Douro*. 5as Jornadas de Hidráulica. Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP.

Santos, C.F. (2014). *Evolução Morfodinâmica da Restinga do Douro a Várias Escalas Temporais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Santos-Ferreira, A., C. Santos (2014). *Molhe Norte da Barra do Douro*. Ingenium II, 141.

Schimmel, A. (2011). *Quantitative comparison of benthic habitat maps derived from Multibeam Echosounder backscatter data*. Thesis, Doctor of Philosophy (PhD), University of Waikato, Hamilton, New Zealand.

Sibson, R. (1981). *A brief description of natural neighbour interpolation*. Interpreting multivariate 21: 21-36.

Stone W. (2016). *An overview of global positioning system continuously operating reference stations*. National Geodetic Survey, NOAA.

Teodoro, A.C., F. Taveira-Pinto, I. Santos (2014). *Morphological and statistical analysis of the impact of breakwaters under construction on a sand spit area (Douro River estuary)*. Journal of Coastal Conservation 18.3: 177-191.

Theberge A., N. Cherkis (2014). *A Note on Fifty Years of Multi-beam*. Hydro International, article, Jun.

Thurman, H., Trujillo, A. (2003). *Introductory oceanography, 10th Edition*. New Jersey: Prentice Hall, 624.

Veloso-Gomes, F., S. Sena (2003). *Zonas inundáveis pelo rio Douro na área de intervenção do programa Polis em Vila Nova de Gaia*. Relatório técnico, Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos – IHRH, 53.

Veloso-Gomes, F., F. Taveira-Pinto, G.M. Paredes (2009). *Estudo da evolução da fisiografia da restinga do Rio Douro desde 2002*. Quartas Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, 10.

Veloso-Gomes, F. (2010). *Contributos para o Plano de Ordenamento do Estuário do Douro*. Quintas Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, 7.

Vieira, M., A. Bordalo (2000). *The Douro estuary (Portugal): a mesotidal salt wedge*. Oceanologica Acta, 23(5), 585-594.

Links (setembro 2017):

<http://www.lowrance.com/en-US/Products/Transducers/HST-DFSBL-DepthTemperature-Transducer-en-us.aspx>

<http://www.lowrance.com/en-US/Products/Transducers/HDI-Skimmer-83-200-Transducer-en-us.aspx>

<http://www.teledyne-reson.com/products/echo-sounder-seabat>

<https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@13&key=cpbzFzk%7Cs%40>

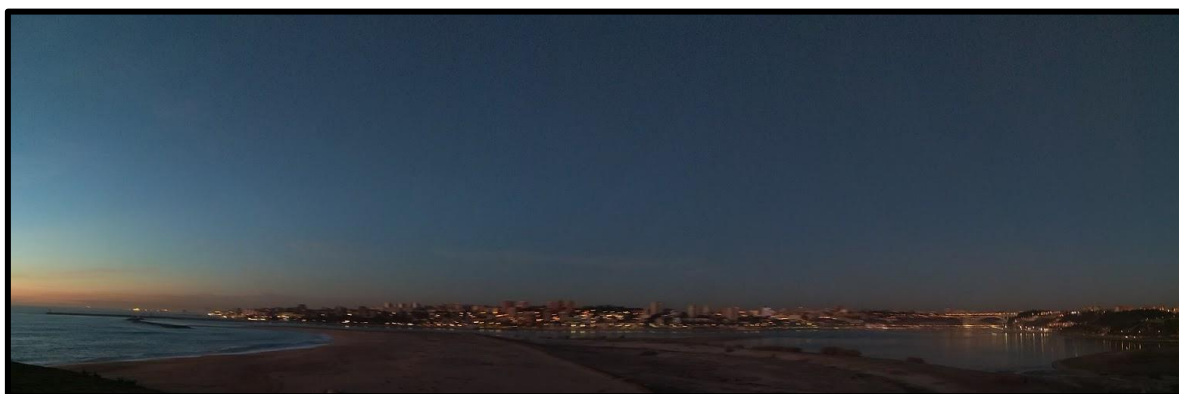
<https://www.navysite.de/ssn/ssn711.htm>

<http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/SSS.html>

<https://www.gebco.net>

<http://snirh.pt/index.php?idMain=2&idItem=1>

<http://ortos.igeo.pt/>



ANEXOS

Tabela A1 – Súmula dos dados em bruto considerados válidos resultantes dos 3 levantamentos efetuados com os sonares (versão extensa).

Dat.Levant.	Sonar	N. Pontos	% Lev. vs Total	% Lev.	Profundidade (m)			Duração Minutos		Dif % Lev.	Diferenças		
					Mín.	Max.	Méd.				Mín.	Max.	Méd.
09-jan	BB	160.059	28,4%	56,3%	0,99	29,68	11,00	204,30	27,7%	13%	0,06	-0,06	-1,02
09-jan	EB	124.438		43,7%	0,93	29,74	12,02						
		284.497				0,93 a 29,74							
02-abr	BB	167.696	29,4%	57,0%	0,80	30,68	10,06	227,89	30,9%	14%	0,00	1,67	-1,24
02-abr	EB	126.469		43,0%	0,80	29,01	11,30						
		294.165				0,80 a 30,68							
05-jun	BB	241.090	42,2%	57,1%	0,44	31,71	9,93	305,38	41,4%	14%	-0,03	2,53	-1,46
05-jun	EB	181.172		42,9%	0,47	29,18	11,39						
		422.262				0,44 a 31,71		737,57					
		1.000.924											

Tabela A2 – Caudal efluente médio (m^3/s) e caudal total (hm^3) mensal da
barragem de Crestuma-Lever, entre janeiro de 2000 e julho de 2017.

Fonte: <http://snirh.pt/> (set. 2017) (versão extensa).

	2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009	
Mês	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T
	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)
Janeiro	439	1 176	4 053	10 856	260	696	2 532	6 782	686	1 838	189	507	250	671	434	1 163	270	722	592	1 585
Fevereiro	321	804	3 254	7 871	359	868	1 293	3 128	771	1 931	224	541	271	655	948	2 294	203	509	1 022	2 473
Março	245	657	4 453	11 927	511	1 369	1 274	3 412	585	1 566	219	587	767	2 055	920	2 465	167	446	388	1 040
Abril	752	1 948	1 017	2 637	363	941	1 069	2 770	447	1 159	301	781	583	1 511	383	993	679	1 760	223	579
Maior	813	2 177	510	1 367	189	506	698	1 870	407	1 090	171	458	264	706	463	1 239	506	1 356	200	536
Junho	238	618	275	714	194	503	231	598	223	578	109	283	167	433	359	931	434	1 125	159	411
Julho	112	300	167	447	35	94	166	445	106	284	63	169	133	356	267	716	193	516	121	325
Agosto	126	338	183	491	30	79	78	209	136	364	46	124	74	197	208	557	74	198	100	268
Setem bro	250	649	199	516	95	245	215	558	221	572	62	162	93	241	197	509	154	400	94	244
Outub ro	246	659	322	861	200	535	380	1 018	381	1 021	37	99	518	1 388	276	739	135	362	148	395
Novem bro	576	1 492	302	782	663	1 719	872	2 260	455	1 180	191	495	1 450	3 758	244	633	107	278	307	796
Dezem bro	2 678	7 172	218	583	2 032	5 443	1 117	2 992	337	903	356	954	1 470	3 937	196	524	241	645	1 223	3 275
Ano	666	17 991	1 246	39 054	411	12 996	827	26 043	396	12 485	164	5 160	503	15 908	408	12 762	264	8 318	381	11 928
%	6,2%		13,5%		4,5%		9,0%		4,3%		1,8%		5,5%		4,4%		2,9%		4,1%	
Média	1 499		3 264		1 083		2 170		1 040		430		1 326		1 064		693		994	
7 meses	417	7 681	1 961	35 819	273	4 975	1 038	19 005	461	8 445	182	3 326	348	6 386	539	9 800	350	6 436	387	6 950
	3,7%		17,1%		2,4%		9,1%		4,0%		1,6%		3,1%		4,7%		3,1%		3,3%	
	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		Caudal		Caudal Total	
Mês	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Caudal M	Caudal T	Médio	% do	Média	
	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	(hm^3)	(m^3/s)	Annual	(hm^3)	
Janeiro	2 054	5 501	1 466	3 928	209	561	814	2 179	1 562	4 184	427	1 143	1 558	4 174	339	908	1 008	16,8%	2 699	
Fevereiro	1 456	3 523	896	2 167	151	378	693	1 676	2 598	6 284	691	1 671	1 546	3 874	633	1 532	963	14,6%	2 343	
Março	1 934	5 179	758	2 030	163	436	1 294	3 467	1 087	2 910	561	1 502	908	2 432	445	1 193	927	15,4%	2 482	
Abril	1 091	2 827	636	1 649	180	466	1 465	3 797	1 121	2 905	357	925	1 930	5 003	216	559	712	11,5%	1 845	
Maior	596	1 596	412	1 105	399	1 070	413	1 106	284	761	411	1 101	1 271	3 405	197	529	456	7,6%	1 221	
Junho	405	1 051	182	472	203	527	237	615	229	594	210	545	389	1 008	137	356	243	3,9%	631	
Julho	287	768	131	351	107	286	140	376	145	387	149	398	217	580	67	180	145	2,4%	388	
Agosto	152	407	106	285	93	248	179	480	136	365	123	331	198	530			120	1,9%	322	
Setem bro	162	420	174	452	75	194	205	531	235	608	198	512	216	559			167	2,5%	434	
Outub ro	179	479	198	529	174	466	329	882	366	979	250	671	238	636			257	4,0%	689	
Novem bro	379	984	446	1 156	336	870	390	1 011	660	1 712	352	913	245	636			469	7,1%	1 216	
Dezem bro	952	2 550	373	999	450	1 207	524	1 404	544	1 457	204	546	294	787			777	12,2%	2 081	
Ano	804	25 285	482	15 121	212	6 709	557	17 524	747	23 148	328	10 257	751	23 623	291	5 256	520		16 351	
%	8,7%		5,2%		2,3%		6,1%		8,0%		3,5%		8,2%		1,8%					
Média	2 107		1 260		559		1 460		1 929		855		1 969		751					
7 meses	1 117	20 445	640	11 700	202	3 724	722	13 216	1 004	18 026	401	7 285	1 117	20 475	291	5 256	636		11 608	
	9,8%		5,6%		1,8%		6,3%		8,6%		3,5%		9,8%		2,5%					

Tabela A3 – Quantificação da Área e do Volume das zonas selecionadas, com análise comparativa das respetivas evoluções (versão extensa).

Data	Área Interior Baía S. Paio			Área Pilotos			Área Barra			Área Exterior		
	Área Superfície m ²	359.500	Δ m ³ /m ²	Área Superfície m ²	253.900	Δ m ³ /m ²	Área Superfície m ²	190.000	Δ m ³ /m ²	Área Superfície m ²	950.800	Δ m ³ /m ²
Vol. m ³	Δ m ³	% Vol.	Vol. m ³	Δ m ³	% Vol.	Vol. m ³	Δ m ³	% Vol.	Vol. m ³	Δ m ³	% Vol.	Vol. m ³
Set. 2015	1.737.219			1.580.608			1.404.333					
Mar. 2016	1.991.822	254.603	12,8%	1.790.659	210.051	11,7%	1.554.434	150.101	9,7%	0,79		
Jan. 2017	1.813.703	-178.119	-9,8%	1.679.757	-110.902	-6,6%	1.498.820	-55.614	-3,7%	-0,29	14.854,229	
Abr. 2017	1.782.729	-30.974	-1,7%	1.640.837	-38.920	-2,4%	1.469.766	-29.054	-2,0%	-0,15	14.993,973	139.744
Jun. 2017	1.761.413	-21.316	-1,2%	1.620.158	-20.679	-1,3%	1.458.289	-11.477	-0,8%	-0,06	14.984,392	-9.581
Δ Jan. a Jun. 17	-52.290	-2,9%	-0,15	-59.599	-3,5%	-0,23	-40.531	-2,7%	-0,21	130.163	0,9%	0,14
Δ Set. 15 a Jun. 17	24.194	1,4%	0,07	39.550	2,5%	0,16	53.956	3,8%	0,28			